

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 11/06/2022.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas Campus de Rio Claro

LUCAS VITURI SANTAROSA

IMPACTOS ANTROPOGÊNICOS E CLIMÁTICOS NOS PROCESSOS
HIDROLÓGICOS: UMA ABORDAGEM MÚLTIPLA SOBRE A FUNÇÃO
DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS
COMPLEXAS NO ESTADO DE SÃO PAULO

Rio Claro (SP)
2020

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas Campus de Rio Claro

LUCAS VITURI SANTAROSA

IMPACTOS ANTROPOGÊNICOS E CLIMÁTICOS NOS PROCESSOS
HIDROLÓGICOS: UMA ABORDAGEM MÚLTIPLA SOBRE A FUNÇÃO
DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS
COMPLEXAS NO ESTADO DE SÃO PAULO

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

Orientador: Prof. Dr. Didier Gastmans

Rio Claro (SP)
2020

S233i	<p>Santarosa, Lucas Vituri</p> <p>Impactos antropogênicos e climáticos nos processos hidrológicos: uma abordagem múltipla sobre a função das águas subterrâneas em bacias hidrográficas complexas no Estado de São Paulo / Lucas Vituri Santarosa. -- Rio Claro, 2020</p> <p>123 p.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro</p> <p>Orientador: Didier Gastmans</p> <p>1. Isótopos Estáveis. 2. Separação de Hidrograma. 3. Fluxo de Base. 4. Interação águas subterrâneas e superficiais. I. Título.</p>
-------	--

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

LUCAS VITURI SANTAROSA

IMPACTOS ANTROPOGÊNICOS E CLIMÁTICOS NOS PROCESSOS
HIDROLÓGICOS: UMA ABORDAGEM MÚLTIPLA SOBRE A FUNÇÃO
DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS
COMPLEXAS NO ESTADO DE SÃO PAULO

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

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Didier Gastmans (orientador, CEA/UNESP/Rio Claro/SP)
Prof. Dr. Paulo Henrique Ferreira Galvão (IGC/UFMG/Belo Horizonte/MG)
Prof. Dr. César Augusto Moreira (IGCE/UNESP/Rio Claro/SP)
Profa. Dra. Laura De Simone Borma (INPE/São José dos Campos/SP)
Profa. Dra. Sueli Yoshinaga Pereira (IG/UNICAMP/Campinas/SP)

Conceito: APROVADO

Rio Claro – SP, 11 de dezembro de 2020

À Juliana, meu grande amor.

AGRADECIMENTOS

Uma jornada não se trata apenas de desbravar territórios e enfrentar os perigos do mundo real, muitas vezes os desafios da jornada estão no seu interior. Para superar os desafios, a família e os amigos são fontes de energia necessárias para seguir o caminho. Não imaginava os desafios que enfrentaria, muito menos as pessoas maravilhosas que encontraria em meu caminho. Sempre que precisei algum amigo ou familiar estava ao meu lado para auxiliar, sou muito grato por todos que fizeram parte dessa história.

Agradeço ao amor, companheirismo e determinação emanados pela minha esposa Juliana Boza. A construção de uma família ao seu lado segue seu rumo, sou imensamente grato por sua paciência, compreensão e apoio. O caminho não foi fácil e não será, seguimos juntos. A minha vida é mais feliz ao seu lado.

Agradeço a vida oferecida pelos meu país e avos e a vivência com meus irmãos, sogros, tios e tias, direta ou indiretamente vocês me mostraram a direção que precisava seguir. Espero que um dia entendam minha perspectiva e compreendam o caminho que escolhi. Decidi seguir minha vida, mas reconheço minhas origens e o suporte oferecido.

Agradeço aos amigos e irmãos (biológicos ou não), sem dúvida vocês têm importância imensurável na minha trajetória. Me ensinaram a acolher e amar, e estiveram ao meu lado em diferentes momentos e situações. Sem dúvida fizeram a diferença na minha vida. Vocês têm minha gratidão eterna e foram extremamente importantes ao longo do caminho. Como tenho medo de esquecer algum nome, espero que ao lerem estas palavras se sintam abraçados.

Sou eternamente grato aos meus professores e orientadores, represento o resultado dos seus esforços para transmitir conhecimento. Agradeço especialmente ao Prof. Dr. Didier Gastmans, que me acolheu como aluno e me orientou nos últimos 4 anos. Um excelente professor, me tirou da zona de conforto e me deixa hoje em um patamar mais elevado do que quando nos conhecemos. Só cheguei até aqui pelo esforço de cada um de vocês. Muitas vezes vocês cumpriram o papel de familiares e amigos, quero poder fazer o mesmo para auxiliar cada um que me procure para orienta-los.

Agradeço aos colegas de trabalho e por participar da fundação do Laboratório de Recursos Hídricos e Isótopos Ambientais (LARHIA), foi uma incrível experiência colaborar com tantas pessoas. Seguimos trabalhando de alguma forma. Deixo um agradecimento especial (e redundante) aos amigos membros da diretoria do LARHIA pelos momentos e conhecimento compartilhados.

Agradeço à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) pelos recursos e estrutura oferecidas nos diferentes lugares que estive nestes 11 anos. Em especial, as estruturas e recursos oferecidos no Centro de Estudos Ambientais (CEA) e Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da UNESP de Rio Claro para execução deste estudo.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de doutorado concedida (Processo: 2017/13576-9) e aos recursos do projeto coordenado pelo Didier Gastmans (Processo: 2018/06666-4), foram fundamentais para o desenvolvimento dessa tese. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

“As paixões humanas são misteriosas [...]. As pessoas que as experimentam não as sabem explicar, e as que nunca as viveram não as podem compreender.” (ENDE, 2000, p.6)

SANTAROSA, L.V. (2020) Impactos antropogênicos e climáticos nos processos hidrológicos: uma abordagem múltipla sobre a função das águas subterrâneas em bacias hidrográficas complexas no estado de São Paulo. 122 p. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP-Rio Claro.

RESUMO

A crescente pressão mundial sobre os recursos hídricos, sob condições naturais e antropogênicas, requer abordagens multidisciplinares integradas para lidar com as questões científicas e sociais. Avaliar a magnitude dos impactos das ações antrópicas e das variações climáticas nos processos hidrológicos é crucial para direcionar as ações dos gestores dos recursos hídricos e minimizar os efeitos negativos de ordem social, econômica ou ambiental. Para isso, foram combinados métodos de modelagem aplicada a dados hidrológicos (fluviométricos e pluviométricos) e isotópicos (^2H e ^{18}O) nas dimensões temporal e espacial, para compreensão do regime hidrogeológico do fluxo de base e avaliar sua função na resiliência hídrica. O estudo foi desenvolvido em um cenário de variações climáticas e das atividades antropogênicas nas bacias Piracicaba-Capivari-Jundiaí (UGRHI5 - PCJ) e Tietê-Jacaré (UGRHI 13 - TJ). Os resultados revelam que a resiliência hídrica das bacias estudadas é controlada pela interação direta do regime de chuvas com os domínios hidrogeológicos. No domínio cristalino, onde se localiza grande parte das bacias PCJ, a capacidade de armazenamento do excedente hídrico do período úmido é menor, o que aumenta a importância das chuvas para geração de escoamento direto e compor as vazões. No domínio sedimentar, que inclui parte das bacias PCJ e as bacias TJ, apresentam maior capacidade de armazenamento em seus aquíferos, onde o fluxo de base proporciona uma maior estabilidade sazonal das vazões. A modelagem dos dados mostra que as vazões anuais são mantidas por uma parcela de água subterrâneas que varia de 50 a 70% do volume total no domínio cristalino, enquanto que no sedimentar a contribuição varia de 70 a 80%. Conclui-se que o regime hidrológico no domínio cristalino tem maior dependência das águas superficiais e é mais vulnerável às estiagens prolongadas, enquanto que o domínio sedimentar apresenta maior segurança hídrica. A vulnerabilidade das bacias PCJ às reduções nos volumes de chuva e as atividades antrópicas revelam variações negativas nas vazões e do armazenamento mínimo, também refletida em mudanças nos sinais isotópicos. Situação menos acentuada nas bacias TJ, mas com estado de atenção para exploração dos aquíferos. Contudo, é recomendado aos gestores uma abordagem

adaptativa e a ampliação da capacidade de monitoramento das bacias, tanto dos recursos hídricos superficiais como os subterrâneos. Destaca-se o potencial dos isótopos estáveis de H e O como uma metodologia complementar ao monitoramento convencional, com capacidade de descrever processos climáticos sazonais e de antropização em um contexto espacial hidrogeológico heterogêneo. O presente estudo ressalta a questão da resiliência hídrica numa região de grande importância econômica e social no Brasil e contribui para o arcabouço científico voltado à aplicação isotópica em grandes bacias.

Palavras Chave: Isótopos estáveis. Separação de hidrograma. Fluxo de base. Interação águas subterrâneas e superficiais.

SANTAROSA, L.V. (2020) Anthropogenic and climatic impacts on hydrological processes: a multiple approach on the role of groundwater in complex watersheds in the state of São Paulo. 122 p. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP-Rio Claro.

ABSTRACT

The increasing global pressure on water resources, under natural and anthropogenic conditions, requires integrated multidisciplinary approaches to cope with scientific and social issues. Assessing the magnitude of the impacts of anthropic actions and climatic variations on hydrological processes is crucial to inform the water resources managers about the actions to be performed and minimize the negative effects in social, economic, or environmental functions of water. For this, modeling methods applied to hydrological (fluviometry and pluviometry) and isotopic (^2H and ^{18}O) data in the temporal and spatial dimensions were combined, to understand the hydrogeological regime of the baseflow and evaluate its function in water resilience. The study was conducted in a scenario of climatic variations and anthropogenic activities in the Piracicaba-Capivari-Jundiaí (UGRHI 5 - PCJ) and Tietê-Jacaré (UGRHI 13 - TJ) basins. The results reveal that the water resilience of the studied basins is controlled by the direct interaction of the rain regime with the hydrogeological domains. In the crystalline domain, where most of the PCJ basins are located, the storage capacity of the water surplus in the wet period is less, which increases the importance of the rains for generating direct runoff and composing the streamflow. In the sedimentary domain, which includes part of the PCJ basins and the TJ basins, they have greater storage capacity in their aquifers, where the baseflow provides greater seasonal stability of the streamflow. The modeling of the data shows that the annual streamflow are maintained by a portion of groundwater that varies from 50 to 70% of the total volume in the crystalline domain, while in the sedimentary the contribution varies from 70 to 80%. It is concluded that the hydrological regime in the crystalline domain is more dependent on surface waters and is more vulnerable to prolonged droughts, while the sedimentary domain has greater water security. The vulnerability of the PCJ basins to reductions in rainfall volumes and anthropogenic activities reveal negative variations in streamflow and minimum storage, also reflected in changes in isotopic signs. Less accentuated situation in the TJ basins, but with attention to the exploitation of aquifers. However, it is recommended that managers take an adaptive approach and expand the monitoring capacity of the basins, both surface and underground water resources. The potential

of stable H and O isotopes is highlighted as a complementary methodology to conventional monitoring, capable of describing seasonal climatic and anthropogenic processes in a heterogeneous hydrogeological spatial context. This study highlights the issue of water resilience in a region of great economic and social importance in Brazil and contributes to the scientific framework aimed at isotopic application in large basins.

Key Words: Stable isotopes. Hydrograph separation. Baseflow. Interaction of groundwater and surface water.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Principais bacias TJ e PCJ (A), localização da área de estudo (B); hidrogeologia (C), altimetria (D), Chuva histórica média 1950-2017 (E), Cobertura do solo (F) e textura do solo (G). 42
- Figura 2. Vazões específicas ($L.s^{-1}.km^{-2}$, colunas pretas) mensais com desvio padrão (linhas pontilhadas vermelhas) para as principais estações fluviométricas e bacias da área de estudo entre 1945 e 2017. 49
- Figura 3. Disponibilidade de recursos hídricos superficiais nas bacias de PCJ e TJ e ações que influenciam o regime hidrológico (transposições, estações elevatórias, desmatamento, urbanização, reservatórios e extração de águas subterrâneas). 51
- Figura 4. Localização das estações pluviométricas e demarcação dos polígonos de Thiessen (A), apresentação das estações fluviométricas sobre domínios hidrogeológicos nas bacias TJ (B, UGRHI 13) e PCJ (C, UGRHI 5) 54
- Figura 5. Localização dos dados de isótopos estáveis (H e O) para as fontes de água superficiais e subterrânea 61
- Figura 6. Curvas de duração de vazão ($Ls^{-1} km^{-2}$) para as estações fluviais nos domínios cristalino (A) e sedimentar (B). 65
- Figura 7. Boxplots mensal do *BFI* e do fluxo de base ($Ls^{-1} km^{-2}$) para as estações nos domínios cristalino (A e C) e sedimentar (B e D), chuva mensal (E) e *BFI* para os domínios hidrogeológicos (F). 67
- Figura 8. Gráficos de correlação com coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de correlação de Pearson (R) entre características de recessão (*k*) e Índice de Fluxo de Base (*BFI*) vs declividade e área de contribuição (A, B, D e E), separação em domínios hidrogeológicos de *k* e *BFI* (C e F) e correlações com as áreas de textura do solo vs *S* (H e I) e a porcentagem de rios de segunda ordem vs *BFI* (G). 69
- Figura 9. Standardized Precipitation Index (SPI, 12 meses) para o período de 1950 a 2017 para estações pluviométricas distribuídas pela área de estudo e SPI calculado de 2001 a 2019 com dados de precipitação espacial do GPM IMERG v6. 72
- Figura 10. Vazão específica ($Ls^{-1} km^{-2}$) e linha de tendência suavizada (em vermelho, método loess) para estações fluviométricas com séries mais longas localizadas nas bacias PCJ (1940-2017). A linha pontilhada vermelha representa o período de construção das barragens para o sistema Cantareira e o retângulo vermelho o período de seca (2014 - 2019) identificado no SPI de curto prazo. 74

Figura 11. Vazão específica ($Ls^{-1} km^{-2}$) e linha de tendência suavizada (em vermelho, pelo método de loess) para estações hidrográficas de 1980, localizadas nas bacias PCJ (Corumbataí) e TJ. O retângulo vermelho mostra o período de seca (2014 - 2019) identificado no SPI de curto prazo.....	75
Figura 12. Comportamento temporal da chuva (mm, linha preta pontilhada) e da composição isotópica das estações coletoras com dados obtidos em diferentes períodos (1996-1998 e 2013-2018) e os dados do RCWIP (Regionalized Cluster-Based Water Isotope Prediction), em A são apresentados escala mensal e em B as médias sazonais e anual.....	82
Figura 13. (A) Diagrama do $\delta^{18}O$ e δ^2H das fontes analisadas e (B) Relação da média sazonal da composição isotópica dos rios e águas subterrâneas por aquífero dos rios	84
Figura 14. Distribuição espacial do $\delta^{18}O$ para as águas subterrâneas e chuva (TERZER et al., 2013) com as variações sazonais no período úmido e seco.	86
Figura 15. Variabilidade espacial e temporal do $\delta^{18}O$ (‰) e em relação ao valor médio das amostras de águas subterrâneas (A). Mapas do comportamento da composição isotópica $\delta^{18}O$ e δ^2H e do d-excess nos períodos úmido (B) e seco (C).	88
Figura 16. (A) Razão entre a composição isotópica ($\delta^{18}O$) da água dos rios no período seco (R_s) e águas subterrâneas (A_s) e (B) comparação da composição isotópica ($\delta^{18}O$) dos rios separadas por sistema aquífero e em período úmido (azul) e seco (amarelo) em relação a composição isotópica da água subterrâneas (linha preta) ..	90
Figura 17. Variação mensal do d-excess para os dados GNIR e GNIP na bacia do rio Piracicaba e média mensal de chuva (mm).....	92
Figura 18. Boxplot com a proporção das fontes de água subterrânea (AS, cinza) e chuva (CH, azul) que compõem a vazão dos rios nos domínios cristalino (A) e sedimentar (B) obtido pelo modelo de mistura aplicado aos dados isotópicos	93
Figura 19. Síntese das conclusões em relação a contribuição das águas subterrâneas nas diferentes bacias em relação a abordagem hidrológica e isotópica	98
Figura 20. Vazão específica para as estações fluviométricas comparada entre diferentes métodos de separação de hidrograma. Filtros: Collischonn e Fan (CF), Chapman e Maxwell (CM), Eckhardt ponderado (EKDP) e filtro inverso (INV).	121

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Características hidrogeológicas dos principais sistemas aquíferos do estado de São Paulo (adaptado de QUAGGIO et al., 2020)	45
Tabela 2. Textura do solo segundo mapa pedológico do estado de São Paulo (ROSSI, 2017) e uso do solo para cada bacia hidrográfica segundo a classificação da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2010)	47
Tabela 3. Características climáticas e morfométricas das bacias PCJ e TJ extraídos de dados de chuva do satélite TRMM, evapotranspiração do modelo GLDAS e elevação de Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado a partir de dados SRTM (ver Capítulo 7. Materiais e Métodos).....	48
Tabela 4. Relação de estações fluviométricas e pluviométricas selecionadas para análise de recessão e separação de hidrograma	53
Tabela 5. Características do fluxo das estações fluviométricas, área de contribuição e curvas de duração do fluxo	64
Tabela 6. Parâmetros para a separação do hidrograma, características de recessão, armazenamento mínimo e fluxo de base médio	66
Tabela 7. Resultados dos testes estatísticos não paramétricos para o armazenamento mínimo (<i>S</i>) anual.	70
Tabela 8. Resultados dos testes estatísticos não paramétricos para a precipitação total anual	70
Tabela 9. Média ponderada da composição isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ e d-excess para cada uma das estações coletoras e média do RCWIP (Regionalized Cluster-Based Water Isotope Prediction).....	81
Tabela 10. Valores médios de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, d-excess das amostras das águas dos rios, subterrânea e chuva separadas por domínio hidrogeológico e período seco e úmido	83
Tabela 11. Valores de BFI _{max} para os diferentes métodos, Collischonn e Fan (CF), Eckhardt ponderado (EKDP) e filtro inverso (INV).....	121
Tabela 12. Valores de BFI para os diferentes métodos em estações fluviométricas, teste de sensibilidade (E(BFI c) e valores médios e desvio padrão. Collischonn e Fan (CF), Chapman e Maxwell (CM), Eckhardt ponderado (EKDP) e filtro inverso (INV).	122

Tabela 13. Coeficiente de determinação (r^2) entre os valores de fluxo de base e a vazão no período de recessão. Collischonn e Fan (CF), Chapman e Maxwell (CM), Eckhardt ponderado (EKDP) e filtro inverso (INV)..... 123

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ANA: Agência Nacional de Águas
APD: Aquiclude Passa Dois
ASE: Average Standad Error
ATB: Bacia do rio Atibaia
BFI: Base Flow Index
CAM: Bacia do rio Camanducaia
CAP: Bacias do Rio Capivari
CEA: Centro de Estudos Ambientais
COR: Bacia do Rio Corumbataí
DAEE: Departamento de Águas e Energia Elétrica
ESDA: Exploratory Spatial Data Analysis Graphs
GLDAS: Global Land Data Assimilation System
GMWL: Global Meteoric Water Line ou reta meteórica global
GNIP: Global Network of Isotopes in Precipitation
GNIR: Global Network of Isotopes in Rivers
GPM: Global Precipitation Measurement
IAEA: Internationa Agenci of Atomic Energy
JAG: Bacia do Rio Jaguari
JG: Bacia do Rio Jacaré Guaçu
JND: Bacia do Rio Jundiai
JP: Bacia do Rio Jacaré Pepira
LEN: Bacia do Rio Lenções
LMWL: Local Meteoric Water Line ou reta meteórica loca
MCMC: Markov Chain Monte Carlo
MS: Mean Standarized
NASA: National Aeronautics and Space Administration
ONU: Organização das Nações Unidas
PCJ: Bacias Piracicaba-Capivari-Jundiaí, UGRHI 5
PIB: Produto Interno Bruto
PIR: Bacia do Rio Piracicaba
RCWIP: Regionalized Cluster-Based Water Isotope Prediction
RMC: Região Metropolitana de Campinas
RMS: Root-Mean-Square
RMSP: Região Metropolitana de São Paulo
RMSS: Root-Mean-Square Standardized

SAB: Sistema Aquífero Bauru
SAC: Sistema Aquífero Cristalino
SAG: Sistema Aquífero Guarani
SASG: Sistema Aquífero Serra Geral
SAT: Sistema Aquífero Tubarão
SIG: Sistema de Informação Geográfica
SINRH: Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos
SPI: Standardized Precipitation Index
SRTM: Shuttle Radar Topography Mission
SWAT: Soil and Water Assessment Tool
TIE: Outras bacias afluentes do rio Tietê nas bacias TJ.
TJ: Bacias Tietê-Jacaré, UGRHI 13
UGRHI: Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos
USGS: United States Geological Survey

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS	25
3. INTERAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS: RECARGA DE AQUÍFERO E O FLUXO DE BASE	26
3.1. Análise de recessão e separação de hidrograma	28
4. ISÓTOPOS ESTAVEIS EM ESTUDOS HIDROLÓGICOS.....	33
5. MODELAGEM ESPACIAL.....	38
6. ÁREA DE ESTUDO.....	41
6.1. Contexto hidrogeológico	43
6.2. Aspectos fisiográficos	45
6.3. Caracterização morfométrica e hidrológica das bacias	48
6.4. Interferência Antrópica no Ciclo Hidrológico das bacias PCJ e TJ	50
7. MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
7.1. Abordagem hidrológica	52
7.1.1. Dados hidrológicos	52
7.1.1. Análise de recessão e separação de hidrograma	55
7.1.2. Armazenamento mínimo (S)	56
7.1.3. Análise estatística.....	57
7.1.4. <i>Standardized Precipitation Index</i>	57
7.2. Abordagem isotópica	58
7.2.1. Isótopos estáveis.....	58
7.2.2. Análise espacial.....	61
7.2.3. Modelo de mistura	62
8. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
8.1. Caracterização hidrológica e da resiliência hídrica das bacias PCJ e TJ	63
8.1.1. Análise hidrológica	63
8.1.2. Separação de hidrograma e análise de recessão	65
8.1.3. Tendências nos dados hidrológicos.....	69
8.1.4. Standardized precipitation index (SPI).....	71
8.1.5. Variação negativa nas series temporais de vazão	73

8.1.6. Análise da resiliência hídrica diante dos efeitos antropogênicos e climáticos no regime hidrológico das bacias PCJ e TJ.....	76
8.2. Hidrologia isotópica das bacias PCJ e TJ	81
8.2.1. Análise das variações isotópicas nas bacias PCJ e TJ.....	94
9. CONCLUSÕES	97
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
Anexo A. Estatística descritiva, parâmetros variográficos e validação cruzada dos mapas apresentados.....	116
Anexo B. Resultado dos isótopos estáveis dos rios e águas subterrâneas	118
Anexo C. Análise de diferentes métodos de separação de hidrograma	119

1. INTRODUÇÃO

As mudanças nos padrões climáticos e o aumento da pressão sobre os recursos hídricos são pontos cruciais no futuro da gestão da água (MARENGO et al., 2009; GOSLING; ARNELL, 2016; MEKONNEN; HOEKSTRA, 2016). As projeções da ONU (Organização das Nações Unidas) indicam um crescimento da demanda por água será em torno de 40% até 2050, e estima-se que até 2025 dois terços da população mundial esteja sob condições em que os suprimentos de água potável não sejam suficientes (UN, 2015).

Um dos grandes desafios para os gestores é o conhecimento da resiliência hídrica diante dessas perturbações (FOLKE, 2006; KEYS et al., 2019). A resiliência hídrica representa a habilidade do ciclo hidrológico em manter o suprimento de água estável, com capacidade de atender as necessidades dos ecossistemas, biomas e assegurar o abastecimento de água estável para as sociedades (FALKENMARK; WANG-ERLANDSSON; ROCKSTRÖM, 2019).

A região sudeste do Brasil tem vivenciado uma situação preocupante em relação à sua resiliência hídrica, com impactos diretos sobre as grandes regiões metropolitanas. Recentemente este quadro se instalou após eventos consecutivos de seca entre os anos de 2011 e 2019 (CUNHA et al., 2019), ocasionando grandes reduções das reservas de água destinadas ao abastecimento, intensificando a crise hídrica no estado de São Paulo (COUTINHO; KRAENKEL; PRADO, 2015; MARENGO et al., 2015; COELHO et al., 2016; COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2016; NOBRE et al., 2016; GUZMÁN et al., 2017). A situação se agrava por conta de um quadro de demanda elevado combinada à deterioração da qualidade dos recursos hídricos (SÃO PAULO, 2017; CETESB, 2018).

Diante desta realidade, avaliar a magnitude dos impactos das ações antrópicas e das variações climáticas nos processos hidrológicos que integram a resiliência hídrica das diferentes regiões do estado de São Paulo é crucial para direcionar as ações dos gestores dos recursos hídricos e minimizar os efeitos negativos de ordem social, econômica e ambiental.

O conhecimento a respeito da interação entre rios e aquíferos proporciona entendimento importante no campo científico e da gestão dos recursos hídricos para elaboração de políticas públicas voltadas à segurança hídrica. Conhecimento que permite direcionar esforços na alocação de recursos e priorização da gestão de

impacto do uso da água e no aumento da capacidade de adaptação à variação climática em áreas com crescimento potencial da demanda (DAMS et al., 2012; SÁNCHEZ-MURILLO et al., 2015; ALLEY, 2016; ROSS, 2018).

A crescente pressão mundial sobre os recursos hídricos, em condições naturais e antropogênicas, requer uma abordagem multidisciplinar e integrada para lidar com as questões científicas e sociais envolvidas (BARBIERI, 2019). Para isso, é necessário o conhecimento detalhado da dinâmica das diferentes fontes de água disponíveis com a aplicação de técnicas de modelagem capazes de determinar os componentes e fluxos hidrológicos. Neste contexto, são relevantes técnicas de separação de hidrograma utilizando filtros digitais recursivos (ECKHARDT, 2005, 2008; ZHANG et al., 2017a), análise de recessão (TALLAKSEN, 1995; BISWAL; KUMAR, 2014; STEWART, 2015) ou aplicação de traçadores ambientais químicos e isotópicos (TETZLAFF et al., 2015a; LOTT; STEWART, 2016).

O ponto central dos estudos hidrológicos é entender a origem da água, o caminho que ela percorre e o quanto permanece na bacia. Os isótopos estáveis são ferramentas importantes para auxiliar os hidrólogos e hidrogeólogos para a compreensão das relações espaciais e temporais na bacia, por interpretações que não seja apenas as dos parâmetros físicos, ao definir processos dominantes no escoamento, ação de fatores ambientais, tempo residência e separação dos componentes da vazão dos rios (KENDALL; DOCTOR, 2003; MCGUIRE; MCDONNELL, 2008; AGGARWAL et al., 2012; WEST; FEBRUARY; BOWEN, 2014).

Esta interpretação tem sido utilizada em conjunto com modelagem de dados hidrológicos (separação de hidrograma e análise de recessão) para compreensão do comportamento e interação das diferentes fontes de água que compõem os fluxos das bacias hidrográficas (SOULSBY et al., 2007; KLAUS; MCDONNELL, 2013).

A quantificação do fluxo de base permite identificar a parcela da vazão alimentada pelas descargas de água subterrânea e por fluxos provenientes da zona não saturada diretamente no canal do curso d'água (SCANLON; HEALY; COOK, 2002; LI et al., 2014; LOTT; STEWART, 2016). A análise de recessão tem objetivo modelar a redução da vazão dos rios no período sem precipitação e extrair parâmetro descritivos do armazenamento de água na bacia. (BRUTSAERT; NIEBER, 1977; SÁNCHEZ-MURILLO et al., 2015; STEWART, 2015).

No presente estudo, a modelagem hidrológica foi aplicada em dados hidrológicos e isotópicos nas dimensões temporal e espacial para compreensão do regime hidrológico regional e descrever a interrelação das diferentes fontes de água e características ambientais das bacias.

Essas metodologias combinadas são uma alternativa robusta a ser utilizada para a compreensão dos padrões hidrológicos, com capacidade de gerar informações detalhadas sobre a resiliência hídrica e os mecanismos e processos envolvidos na formação da descarga dos rios (KENDALL; MCDONNELL, 1999; KENDALL; COPLEN, 2001; VITVAR; AGGARWAL; MCDONNELL, 2005; BOWEN, 2010).

Em pequenas bacias (<100km²) os estudos hidrológicos utilizando isótopos estáveis, combinadas ou não com outras técnicas, apresentam bons resultados na caracterização de processos hidrológicos (SOULSBY et al., 2007; TETZLAFF et al., 2007, 2015b; KLAUS; MCDONNELL, 2013).

A aplicação desses métodos em grandes bacias hidrográficas representa um ganho de conhecimento importante para compreensão da dinâmica desse ambiente (HALDER et al., 2015; RECKERTH et al., 2017). Entretanto, para serem bem sucedidos, dependem de adequada cobertura espacial e longos períodos de monitoramento (DUTTON et al., 2005; RANK et al., 2012, 2014; JASECHKO; WASSENAAR; MAYER, 2017; BIRKEL et al., 2018; JUNG et al., 2019).

O presente estudo visa contribuir com o arcabouço de estudos isotópicos em grandes bacias ao estudar as bacias hidrográficas das Unidades de Gerenciamento dos Recursos Hídricos PCJ (Piracicaba-Capivari-Jundiaí, UGRHI 5) e TJ (Tietê-Jacaré, UGRHI 13) com área de 27.000 km².

Nesta área estão localizados total ou parcialmente 107 municípios e cerca de 7 milhões de habitantes. As bacias PCJ apresentam maior desenvolvimento e demanda hídrica para o setor urbano e industrial, as atividades econômicas das bacias representa 17% do PIB (Produto Interno Bruto) do Estado de São Paulo (PCJ, 2018a, 2018b). A área apresenta um quadro de resiliência hídrica comprometido pela redução da qualidade das fontes superficiais, escassez de fontes subterrâneas e grandes demandas da região metropolitana de Campinas e de São Paulo (SÃO PAULO, 2017). As bacias TJ abrigam importante atividade agroindustrial do setor sucroalcooleiro e apresenta maior preservação da resiliência hídrica devido disponibilidade de fontes de água subterrânea, com alguns pontos de estresse na gestão dessa fonte (SÃO PAULO, 2017; TJ, 2019).

Estudos hidrológicos recentes nas bacias PCJ abordaram os efeitos da transposição de água entre bacias PCJ para a Região metropolitana de São Paulo (FREDERICE; BRANDÃO, 2016), situação da disponibilidade dos recursos hídricos (SÁNCHEZ-ROMÁN; FOLEGATTI; ORELLANA-GONZÁLEZ, 2009), estudo do plano de gestão (MARTINS et al., 2017), avaliação de indicadores de mudanças nos padrões de precipitação (MAIA, 2016; BASSO et al., 2017), projeções futuras da variabilidade climática (GESUALDO et al., 2019) e da qualidade da água dos rios (TAFFARELLO et al., 2018), aplicação do modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool, Bressiani, 2017) e sobre as características hidrogeológicas e vulnerabilidade do aquífero Tubarão (EZAKI et al., 2017; IRITANI et al., 2017).

Nas bacias TJ, os estudos mais recentes abordaram o impacto de construção de barragens (VALEZIO; PEREZ FILHO, 2017), avaliação da distribuição espacial da precipitação (SOUZA; GALVANI, 2017), aplicações do modelo SWAT (SANTOS; DE OLIVEIRA; MAUAD, 2020), avaliação de áreas com potencial de serviços ecossistêmicos (PERIOTTO; TUNDISI, 2018), estudos sobre os processos de recarga no Sistema Aquífero Guarani (LUCAS; GUANABARA; WENDLAND, 2012; MELO; WENDLAND; GUANABARA, 2015; LUCAS; WENDLAND, 2016; MELO; WENDLAND, 2017; ANACHE et al., 2019; ROCHA et al., 2019), análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas (TANAJURA; LEITE, 2016) e efeitos do plantio da cana de açúcar nos recursos hídricos (SCARPARE et al., 2016).

Estudos utilizando isótopos estáveis na área de estudo foram aplicados na análise da interação da água superficial e subterrânea na bacia do rio Jacaré-Pepira na área das bacias TJ (BATISTA et al., 2018); na bacia do rio Piracicaba, para investigar as interações entre as diferentes fontes de água em bacia antropizadas (MARTINELLI et al., 2004) e compreender as variações espaciais e sazonais na composição isotópica da precipitação (SANTOS et al., 2019a, 2019b) e; na caracterização de processos hidrogeológicos do aquífero Tubarão (EZAKI et al., 2020).

A análise proposta neste estudo visa incentivar o avanço da implantação de redes de monitoramento isotópicas mais robustas em território nacional para monitoramento dos processos hidrológicos em grandes bacias hidrográficas, visando ampliar o repertório de informações disponíveis para as tomadas de decisão dos órgãos gestores. Soma-se a este objetivo fornecer conhecimento complementar aos estudos que foram gerados anteriormente, com o intuito de compreender as dinâmicas

hidrológicas de recessão controladas pelo fluxo de base e descrever a capacidade de resiliência hídrica associando as abordagens hidrológica e isotópica na investigação.

Este estudo aborda algumas questões científicas: (1) Como é o comportamento do fluxo de base em diferentes condições hidrogeológicas e sua contribuição na resiliência hídrica? (2) Quais os efeitos da antropização ou das variações nos padrões climáticos nas fontes de água das bacias estudadas? (3) As abordagens têm capacidade de descrever os processos hidrológicos investigados? (4) Os métodos são promissores para serem implementadas em programas de monitoramento gestão dos recursos hídricos na área de estudo? (5) Os resultados tem um nível de abrangência que permitem replicar os estudos para outras bacias hidrográficas do estado de São Paulo (ou do Brasil)?

A apresentação dessa tese segue a seguinte estrutura: (Capítulo 2) apresentação dos objetivos; (Capítulos 3, 4 e 5) revisão bibliográfica relacionada aos processos e métodos aplicados neste estudo; (Capítulo 6) apresentação da área de estudo; (Capítulo 7) materiais e métodos separados por abordagem hidrológica e isotópica; (Capítulo 8) resultados e discussões separados em dois subcapítulos também levando em conta a separação metodológica, estes contém os resultados e discussões dos artigos derivados desta tese e; (Capítulo 9) apresenta as conclusões unindo os resultados alcançados pelas diferentes abordagens para responder as questões levantadas.

9. CONCLUSÕES

O estudo mostra que as bacias TJ e PCJ apresentam comportamentos naturais distintos. Uma diferença chave entre as bacias é a magnitude da descarga de água subterrânea que mantém o fluxo do rio, especialmente nos períodos de seca. As bacias do TJ têm uma capacidade natural de manter reservas hídricas, em parte devido a descarga dos aquíferos, o que é uma situação mais segura diante de eventos de mudanças no padrão de chuvas. Por outro lado, as bacias de PCJ apresentam uma situação mais delicada devido ao curto tempo de permanência da água nas bacias, resultando em efeitos mais drásticos com a redução das chuvas.

As abordagens hidrológica e isotópica combinadas descreveram importantes relações entre às fontes de água superficial e subterrânea que integram o regime hidrológico das bacias. É evidente o controle exercido pelo sistema aquífero na resiliência hídrica dos domínios, onde as descargas subterrâneas compõem de 50 a 80% do volume das vazões da área de estudo variando nas dimensões espacial e temporal. (Figura 19).

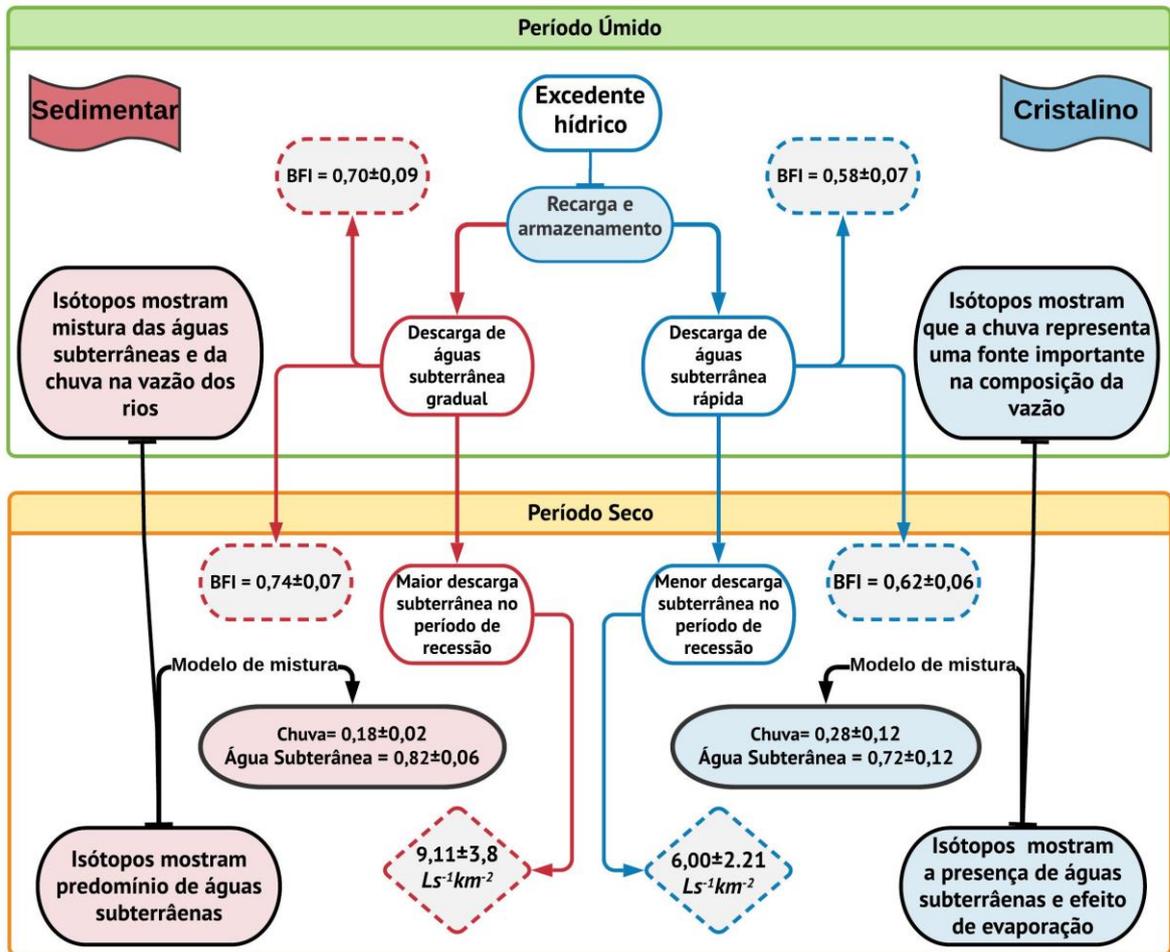


Figura 19. Síntese das conclusões em relação à contribuição das águas subterrâneas nas diferentes bacias utilizando múltiplas abordagens hidrológica e isotópica.

A situação das bacias PCJ é mais crítica e exige mudanças nos planos de manejo. Há uma necessidade de mudança para um modelo adaptativo diante das mudanças nos padrões de chuva afetaram o sistema de abastecimento da RMC e RMSF. A grande demanda hídrica nas bacias do PCJ reduziu a vazão dos rios e o modelo de transferência de água das bacias do PCJ para o sistema Cantareira é insustentável a longo prazo. A poluição da água também limitou a disponibilidade de água. Portanto, recomenda-se o estudo de novas estratégias para gestão dos recursos hídricos na região, pensando em soluções de longo prazo diante das constatações feitas neste estudo.

A região de TJ não mostra indícios dos impactos da ação antrópica ou dos efeitos drásticos da oscilação climática na vazão. Mesmo com certa abundância de recursos hídricos disponíveis, o manejo nas bacias do TJ deve levar em conta as mudanças ambientais, flutuações nos padrões de armazenamento dos aquíferos e o

consumo. A adaptação das estratégias de manejo é essencial para contornar os efeitos da redução das chuvas, principalmente devido ao possível esgotamento dos aquíferos.

Estudos detalhados das bacias do TJ são necessários para verificar a situação dos recursos hídricos subterrâneos e avaliar os impactos dos grandes centros urbanos na variação dos níveis do aquífero e identificar os volumes das reservas renováveis (recarga do aquífero), servindo como parâmetro para estabelecer outorgas de uso de águas subterrâneas. Esses estudos são relevantes devido à possível transferência de recursos hídricos das bacias do TJ para as bacias do PCJ como estratégia para controlar futuras crises hídricas (HIRATA et al., 2015).

O estudo nessas bacias pode ser entendido como uma situação replicável nas demais regiões hidrológicas do estado de São Paulo. Utilizado na previsão do comportamento da resiliência natural da água e possíveis impactos das mudanças nos padrões climáticos e nas atividades humanas em relação aos recursos hídricos superficiais e subterrâneos disponíveis, como uma ação para adequar os planos de gestão dos recursos hídricos.

Os resultados apresentados representam um arcabouço científico importante para a hidrologia isotópica em grandes bacias hidrográficas. O estudo revela que a aplicação e a implementação do monitoramento utilizando isótopos estáveis é uma ferramenta de monitoramento abrangente para descrever os processos de interação entre os compartimentos do ciclo hidrológico, além do respaldo da validação proporcionada pela abordagem hidrológica.

Caso o estudo da abordagem isotópica for replicado visando um estudo de longo prazo e com uma melhor resolução temporal de coleta de amostras, é possível agregar um conjunto de informações mais dinâmico e sensível para o monitoramento dos processos hidrológicos nessas bacias, com capacidade de identificar alterações promovidas pelas variações climáticas e a crescente demanda por recursos hídricos. O que representa um ganho de conhecimento e informação que pode ser incorporado pelo sistema de gerenciamento dos recursos hídricos.

A coleta de informações complementares para o entendimento da dinâmica hidrológica é fundamental para o estabelecimento ou reorganização dos sistemas de gestão, para controlar os efeitos socioeconômicos (e ambientais) frente à variação na disponibilidade dos recursos hídricos, principalmente em regiões densamente povoadas que detêm uma parte importante da produção econômica do Brasil.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGGARWAL, P. K. et al. Stable isotopes in global precipitation: A unified interpretation based on atmospheric moisture residence time. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 11, p. 1–6, 2012.
- AGGARWAL, P. K. et al. Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 8, p. 624–629, 2016.
- AHIABLAME, L. et al. Estimation of annual baseflow at ungauged sites in Indiana USA. **Journal of Hydrology**, v. 476, p. 13–27, 2013.
- ALI, I.; FAMIGLIETTI, J.; MCLELLAND, J. Applications of Satellite Remote Sensing to Water Governance and the Mitigation of Climate Change Effects. **The University of Alabama**, p. 24, 2019.
- ALLEN, S. T.; KIRCHNER, J. W.; GOLDSMITH, G. R. Predicting Spatial Patterns in Precipitation Isotope ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) Seasonality Using Sinusoidal Isoscapes. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 10, p. 4859–4868, maio 2018.
- ALLEY, W. M. Drought-Proofing Groundwater. **Groundwater**, v. 54, n. 3, p. 309–309, 2016.
- ANACHE, J. A. A. et al. Hydrological trade-offs due to different land covers and land uses in the Brazilian Cerrado. v. 23, n. 3, p. 1263–1279, mar. 2019.
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. 2. ed. São Leopoldo/RS: Editora Unisinos, 2013.
- BARBERÁ, J. A.; ANDREO, B. River-spring connectivity and hydrogeochemical interactions in a shallow fractured rock formation. The case study of Fuensanta river valley (Southern Spain). **Journal of Hydrology**, v. 547, p. 253–268, 2017.
- BARBIERI, M. Isotopes in hydrology and hydrogeology. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 2, p. 1–6, 2019.
- BASSO, S. L. et al. Análise do IC e do ICP na unidade de gerenciamento de recursos hídricos dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. In: **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. [s.l.] INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, 2017. 1p. 699–709.
- BATISTA, L. V. et al. Groundwater and surface water connectivity within the recharge area of Guarani aquifer system during El Niño 2014–2016. **Hydrological Processes**, v. 32, n. 16, p. 2483–2495, 2018.
- BATISTA, L. V. **Desvendando a movimentação da água em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG), utilizando análise hidrológica e traçadores isotópicos**. 2019. Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE), Rio Claro, 2019.
- BECK, H. E. et al. Global patterns in base flow index and recession based on streamflow observations from 3394 catchments. **Water Resources Research**, v. 49, n. 12, p. 7843–7863, 2013.
- BERGUERÍA, S. **Package “SPEI”CRAN**, , 2017. . Disponível em: <<http://sac.csic.es/spei>>.
- BIRKEL, C. et al. Characterization of surface water isotope spatial patterns of Scotland. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 194, n. July, p. 71–80, 2018.

- BISWAL, B.; KUMAR, D. N. Study of dynamic behaviour of recession curves. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 3, p. 784–792, 2014.
- BLOOMFIELD, J. P.; ALLEN, D. J.; GRIFFITHS, K. J. Examining geological controls on baseflow index (BFI) using regression analysis: An illustration from the Thames Basin, UK. **Journal of Hydrology**, v. 373, n. 1–2, p. 164–176, 2009.
- BORGES, V. M. et al. Groundwater recharge estimating in the Serra Geral aquifer system outcrop area - Paraná State, Brazil. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 4, p. 338, 2017.
- BORTOLIN, T. A. et al. Relação entre padrões hidroquímicos e as profundidades de fraturas com entra-das de água em rochas vulcânicas ácidas da formação serra geral. **Águas Subterrâneas**, v. 30, n. 1, p. 99, 27 abr. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.14295/ras.v30i1.28585>>. Acesso em: 3 nov. 2020.
- BOWEN, G. J. Spatial analysis of the intra-annual variation of precipitation isotope ratios and its climatological corollaries. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 113, n. 5, p. 1–10, 2008.
- BOWEN, G. J. Statistical and Geostatistical Mapping of Precipitation Water Isotope Ratios. In: **Isoscapes**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. p. 139–160.
- BOWEN, G. J. et al. Water balance model for mean annual hydrogen and oxygen isotope distributions in surface waters of the contiguous United States. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 116, n. 4, p. 1–14, 2011.
- BOWEN, G. J.; GOOD, S. P. Incorporating water isoscapes in hydrological and water resource investigations. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 2, n. 2, p. 107–119, 2015.
- BOWEN, G. J.; WEST, J. B. Isoscapes for Terrestrial Migration Research. In: **Tracking Animal Migration with Stable Isotopes**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 53–84.
- BOWEN, G. J.; WEST, J. B.; HOOGEWERFF, J. Isoscapes: Isotope mapping and its applications. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 102, n. 3, p. v–vii, set. 2009.
- BRESSIANI, D. de A. **Coping with hydrological risks through flooding risk index, complex watershed modeling, different calibration techniques, and ensemble streamflow forecasting**. 2017. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-04042017-155701/>>.
- 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.
- BRUNNER, M. I. et al. **Synthetic design hydrographs for ungauged catchments: A comparison of regionalization methods**. [s.l.] Springer Berlin Heidelberg, 2017. v. 3
- BRUTSAERT, W. **Hydrology : an introduction**. [s.l.] Cambridge University Press, 2005.
- BRUTSAERT, W. Are the North American deserts expanding? Some climate signals from groundwater storage conditions. **Ecohydrology**, v. 5, n. 5, p. 541–549, set. 2012.
- BRUTSAERT, W.; NIEBER, J. L. Regionalized drought flow hydrographs from a

mature glaciated plateau. **Water Resources Research**, v. 13, n. 3, p. 637–643, 1977.

BRUTSAERT, W.; SUGITA, M. Is Mongolia's groundwater increasing or decreasing? The case of the Kherlen River basin / Les eaux souterraines de Mongolie s'accroissent ou décroissent-elles? Cas du bassin versant la Rivière Kherlen. **Hydrological Sciences Journal**, v. 53, n. 6, p. 1221–1229, dez. 2008.

CARLIER, C. et al. Geology controls streamflow dynamics. **Journal of Hydrology**, n. August, 2018.

CETESB, C. A. do E. de S. P. **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo 2017**. [s.l: s.n.]

CHAPMAN, T. A comparison of algorithms for streamflow recession and baseflow separation. **Hydrological Processes**, v. 13, n. July 1998, p. 701–714, 1999.

CHAPMAN, T.; MAXWELL, A. Baseflow Separation - Comparison of Numerical Methods with Tracer Experiments. **23rd Hydrology and Water Resources Symposium**, NATIONAL CONFERENCE PUBLICATION- INSTITUTION OF ENGINEERS AUSTRALIA NCP. n. May, p. 539–545, 1996.

CHIEW, F.; SIRIWARDENA, L. TREND – User Guide. **Manual, Guia, Norma**, p. 29, 2005.

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.

COELHO, C. A. S. et al. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11–12, p. 3737–3752, 1 jun. 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-015-2800-1>>. Acesso em: 4 set. 2020.

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 125, n. 3–4, p. 769–784, 1 ago. 2016. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-015-1540-9>>. Acesso em: 4 set. 2020.

COLLISCHONN, W.; FAN, F. M. Defining parameters for Eckhardt's digital baseflow filter. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 18, p. 2614–2622, ago. 2013.

COURTIOL, A. et al. Isoscape Computation and Inference of Spatial Origins With Mixed Models Using the R package IsoriX. In: **Tracking Animal Migration with Stable Isotopes**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 207–236.

COUTINHO, R. M.; KRAENKEL, R. A.; PRADO, P. I. Catastrophic Regime Shift in Water Reservoirs and São Paulo Water Supply Crisis. **PLOS ONE**, v. 10, n. 9, p. e0138278, 2015. Disponível em: <<http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0138278>>.

CPRM, S. G. do B. **Mapa Geológico e Litoestratigráfico do Estado de São Paulo: escala 1:750.000**. [s.l: s.n.].

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

CROSBIE, R. S. et al. Potential climate change effects on groundwater recharge in

the High Plains Aquifer, USA. **Water Resources Research**, v. 49, n. 7, p. 3936–3951, jul. 2013.

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

DAEE, D. de Á. e E. E. et al. **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo escala 1:1.000.000: nota explicativa**. [s.l: s.n.].

DAEE, D. de Á. e E. E. **DAEE: Banco de Dados Hidrológicos**. Disponível em: <<http://www.hidrologia.dae.gov.br/>>.

DAMS, J. et al. Spatio-temporal impact of climate change on the groundwater system. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 5, p. 1517–1531, maio 2012.

DANIELESCU, S.; MACQUARRIE, K. T. B.; POPA, A. SEPHYDRO: A Customizable Online Tool for Hydrograph Separation. **Groundwater**, v. 56, n. 4, p. 589–593, 2018.

DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation. **Tellus**, v. 16, n. 4, p. 436–468, 1964.

DE PAULA E SILVA, F.; HUNG KIANG, C.; CAETANO-CHANG, M. R. Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, v. 19, n. 2, jun. 2005.

DEL CASTILLO, J. et al. Isoscapes of tree-ring carbon-13 perform like meteorological networks in predicting regional precipitation patterns. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 118, n. 1, p. 352–360, mar. 2013.

DENG, K. et al. Three Gorges Dam alters the Changjiang (Yangtze) river water cycle in the dry seasons: Evidence from H-O isotopes. **Science of the Total Environment**, v. 562, p. 89–97, 2016.

DIERAUER, J.; WHITFIELD, P. **Daily Streamflow Trend and Change Point Screening** Vienna, Austria CRAN, , 2018. .

DOBLE, R. C.; CROSBIE, R. S. Review: Current and emerging methods for catchment-scale modelling of recharge and evapotranspiration from shallow groundwater. **Hydrogeology Journal**, v. 25, n. 1, p. 3–23, 2017. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10040-016-1470-3>>.

DRUCK, S. et al. Prefácio. **Análise Espacial de Dados Geográficos**, p. 3, 2004.

DUNCAN, H. P. Baseflow separation – A practical approach. **Journal of Hydrology**, v. 575, n. November 2018, p. 308–313, 2019.

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.

ECKHARDT, K. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. **Hydrological Processes**, v. 19, n. 2, p. 507–515, 2005.

ECKHARDT, K. A comparison of baseflow indices, which were calculated with seven different baseflow separation methods. **Journal of Hydrology**, v. 352, n. 1–2, p. 168–173, 2008.

ECKHARDT, K. Technical note: Analytical sensitivity analysis of a two parameter recursive digital baseflow separation filter. **Hydrology and Earth System Sciences**,

v. 16, n. 2, p. 451–455, 2012.

ENDE, M. **A história sem fim**. São Paulo/SP: Matins Fontes, 2000.

ENGELBRECHT, B. Z. **Modelo conceitual de circulação de água subterrânea em aquífero cristalino no município de Itu/SP**. 2017. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro/SP, 2017. Disponível em:

<<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/150778>>. Acesso em: 18 ago. 2020.

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

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

<<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10256016.2020.1797714>>. Acesso em: 18 set. 2020.

FALKENMARK, M.; WANG-ERLANDSSON, L.; ROCKSTRÖM, J. Understanding of water resilience in the Anthropocene. **Journal of Hydrology X**, v. 2, p. 100009, 2019.

FOLKE, C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. **Global Environmental Change**, v. 16, n. 3, p. 253–267, ago. 2006.

FREDERICE, A.; BRANDÃO, J. L. B. Efeito do sistema cantareira sobre o regime de vazões na bacia do rio piracicaba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 4, p. 797–810, 2016.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. [s.l.] Prentice-Hall, 1979.

GAO, J. et al. Precipitation Water Stable Isotopes in the South Tibetan Plateau: Observations and Modeling *. **Journal of Climate**, v. 24, n. 13, p. 3161–3178, jul. 2011.

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

GASTMANS, D.; MENEGÁRIO, A. A.; HUTCHEON, I. Stable isotopes, carbon-14 and hydrochemical composition from a basaltic aquifer in São Paulo State, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 4, 2017. Disponível em:

<https://idp.springer.com/authorize/casa?redirect_uri=https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s12665-017-6468-1.pdf&casa_token=KLgJps--KLAaaaa:hqv9_W_LXDx9Yqe6urrrmGc6lrB3mVw6US5CsKqrCldVvKFwmZEUWThYtuH-Oq8qkKcFwuiHU6wFoBRtEYA>. Acesso em: 27 out. 2020.

GEBREMICHAEL, M.; HOSSAIN, F. **Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010.

GESUALDO, G. et al. Assessing water security in the Sao Paulo metropolitan region

- under projected climate change. **Hydrology And Earth System Sciences**, v. 23, n. 12, p. 4955–4968, 2019. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10150/636739>>.
- 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.
- GOLDSMITH, G. R. et al. Stable isotopes reveal linkages among ecohydrological processes in a seasonally dry tropical montane cloud forest. **Ecohydrology**, v. 5, n. 6, p. 779–790, 2012.
- GÓMEZ, D. et al. Aquifer Responses to Rainfall through Spectral and Correlation Analysis. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, p. 1–14, 2018.
- GOOD, S. P. et al. D/H isotope ratios in the global hydrologic cycle. p. 5042–5050, 2015.
- GOSLING, S. N.; ARNELL, N. W. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. **Climatic Change**, v. 134, n. 3, p. 371–385, fev. 2016.
- GUZMÁN, D. A. et al. Economic impacts of drought risks for water utilities through Severity-Duration-Frequency framework under climate change scenarios. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, p. 1–39, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/hess-2017-615>>.
- HALDER, J. et al. The Global Network of Isotopes in Rivers (GNIR): Integration of water isotopes in watershed observation and riverine research. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 8, p. 3419–3431, 2015.
- HALL, F. R. Base-Flow Recessions—A Review. **Water Resources Research**, v. 4, n. 5, p. 973–983, 1968.
- HATVANI, I. G. et al. Geostatistical analysis and isoscape of ice core derived water stable isotope records in an Antarctic macro region. **Polar Science**, v. 13, p. 23–32, set. 2017.
- HEALY, R. W. **Estimating Groundwater Recharge**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- HENGL, T. **A Practical guide to Geostatistical Mapping**. [s.l: s.n.]
- HERNANDES, T. A. D.; BUFON, V. B.; SEABRA, J. E. A. Water footprint of biofuels in Brazil: assessing regional differences. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 8, n. 2, p. 241–252, 1 mar. 2014. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/bbb.1454>>. Acesso em: 30 abr. 2020.
- HIRATA, R. et al. O sistema Aquífero Guarani e a crise hídrica nas regiões de campinas e são paulo (sp). **Revista USP**, v. 1, n. 106, p. 59–70, 2015. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/110025/108625>>. Acesso em: 20 maio. 2020.
- HUFFMAN, G. J. et al. **GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree x 0.1 degree V06, , Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)**.
- IBGE, I. B. de G. e E. **Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra** . [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do>>

brasil.html?=&t=notas-tecnicas>. Acesso em: 14 abr. 2020.

IRITANI, M. A. et al. Perigo de contaminação da água subterrânea na região de Indaiatuba a Capivari, estado de São Paulo, Brasil. **Revista do Instituto Geológico**, v. 38, n. 1, p. 1–16, 2017.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied Geostatistics**. [s.l: s.n.]v. 21

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. **Global isotope hydrogeology—Review**. [s.l: s.n.]

JASECHKO, S.; WASSENAAR, L. I.; MAYER, B. Isotopic evidence for widespread cold-season-biased groundwater recharge and young streamflow across central Canada. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 12, p. 2196–2209, 2017.

JOHNSTON, K. et al. Using ArcGIS geostatistical analyst. In: **ESRI**. [s.l: s.n.]p. 300.

JUNG, Y. Y. et al. Using stable isotopes and tritium to delineate groundwater flow systems and their relationship to streams in the Geum River basin, Korea. **Journal of Hydrology**, v. 573, n. December 2018, p. 267–280, 2019.

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.; DOCTOR, D. H. Stable Isotope Applications in Hydrologic Studies. In: **Treatise on Geochemistry**. [s.l.] Pergamon, 2003. 5–9p. 319–364.

KENDALL, C.; MCDONNELL, J. J. **Isotope tracers in catchment hydrology**. [s.l: s.n.]

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.

KEYANTASH, J. **The Climate Data Guide: Standardized Precipitation Index (SPI)**National Center for Atmospheric Research Staff, , 2018. . Disponível em: <<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/standardized-precipitation-index-spi>>. Acesso em: 30 mar. 2020.

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

KILLIAN, C. D. et al. Characterizing groundwater and surface-water interaction using hydrograph-separation techniques and groundwater-level data throughout the Mississippi Delta, USA. **Hydrogeology Journal**, v. 2000, p. 2167–2179, 2019.

KIM, J. H.; JACKSON, R. B. A Global Analysis of Groundwater Recharge for Vegetation, Climate, and Soils. **Vadose Zone Journal**, v. 11, n. 1, p. 0, 2012.

KITANIDIS, P. K. (Peter K. . **Introduction to geostatistics : applications to hydrogeology**. [s.l.] Cambridge University Press, 1997.

KLAUS, J.; MCDONNELL, J. J. J. Hydrograph separation using stable isotopes: Review and evaluation. **Journal of Hydrology**, v. 505, p. 47–64, nov. 2013.

KNISEL JR., W. G. Baseflow Recession Analysis for Comparison of Drainage Basins and Geology. **J. Geophys. Res.**, v. 68, n. 12, p. 3649–3653, 1963.

KRAUSE, E.; KRIVORUCHKO, K. Concepts and Applications of Kriging. In: ESRI -

TECNICAL WORKSHOP, São Diego, Califórnia. **Anais...** São Diego, Califórnia: 2012.

LACEY, G. C.; GRAYSON, R. B. Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia. **Journal of Hydrology**, v. 204, n. 1–4, p. 231–250, 1998.

LI, L. et al. Framework for assessing and improving the performance of recursive digital filters for baseflow estimation with application to the Lyne and Hollick filter. **Environmental Modelling and Software**, v. 41, p. 163–175, 2013.

LI, L. et al. Performance assessment and improvement of recursive digital baseflow filters for catchments with different physical characteristics and hydrological inputs. **Environmental Modelling and Software**, v. 54, p. 39–52, 2014.

LI, X. et al. Anthropogenic effects on hydrogen and oxygen isotopes of river water in cities. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 22, nov. 2019.

LIU, Y. et al. Ecohydrological Separation Hypothesis : p. 1–19, 2020.

LOTT, D. A.; STEWART, M. T. Base flow separation: A comparison of analytical and mass balance methods. **Journal of Hydrology**, v. 535, p. 525–533, 2016.

LUCAS, M. C.; GUANABARA, R. C.; WENDLAND, E. Estimativa de recarga subterrânea em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani. **Boletim Geológico y Minero**, v. 123, n. 3, p. 311–323, 2012.

LUCAS, M.; WENDLAND, E. Recharge estimates for various land uses in the Guarani aquifer system outcrop area. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 7, p. 1253–1262, 2016.

LYKOUKDIS, S. P.; ARGIRIOU, A. A. Gridded data set of the stable isotopic composition of precipitation over the eastern and central Mediterranean. v. 112, n. June, p. 1–10, 2007.

LYNE, V.; HOLLICK, M. Stochastic time-variable rainfall-runoff modelling. **Institute of Engineers Australia National Conference**, p. 89–93, 1979.

MA, C. et al. Uncertainty Estimation using Bootstrapped Kriging Predictions for Precipitation Isoscapes. **AGU Fall Meeting Abstracts**, v. 2017, p. H51E-1331, dez. 2017.

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.

MAIA, C. B. **Balço hídrico climático distribuído como suporte a decisão para ações de restauração florestal na bacia do rio Piracicaba**. 2016. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

MARCHETTI, D. W.; MARCHETTI, S. B. Stable isotope compositions of precipitation from Gunnison, Colorado 2007–2016: implications for the climatology of a high-elevation valley. **Heliyon**, v. 5, n. 7, p. e02120, jul. 2019.

MARENGO, J. A. et al. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 15, p. 2241–2255, dez. 2009.

MARENGO, J. A. et al. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo.

- Revista USP**, v. 106, p. 31–44, 2015. Disponível em: <<http://www.periodicos.usp.br/revusp/article/view/110101/108684>>. Acesso em: 16 abr. 2020.
- MARTINELLI, L. A. et al. Using stable isotopes to determine sources of evaporated water to the atmosphere in the Amazon basin. **Journal of Hydrology**, v. 183, n. 3–4, p. 191–204, 1996.
- MARTINELLI, L. A. et al. Isotopes in Environmental and Health Studies The Piracicaba river basin : isotope hydrology of a tropical river basin under anthropogenic stress. **Isotopes in Environmental and Health Studies**, v. 40, n. March 2004, p. 45–56, 2004.
- MARTINS, P. D. et al. Study of water resources management plans as a tool for integrated watershed management. **International Journal of River Basin Management**, v. 15, n. 4, p. 445–452, 2 out. 2017. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15715124.2017.1372444>>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- MATSUI, E. et al. Vazões relativas dos rios Negro e Solimões através das concentrações de ^{18}O (). **Acta Amazonica**, v. 2, n. 3, p. 31–46, dez. 1972.
- MATSUI, E. et al. Isotopic hydrology in the Amazonia: 2. Relative discharges of the Negro and Solimões rivers through ^{18}O concentrations. **Water Resources Research**, v. 12, n. 4, p. 781–785, 1976.
- MCDONNELL, J. J. Where does water go when it rains? Moving beyond the variable source area concept of rainfall-runoff response. **Hydrological Processes**, v. 17, n. 9, p. 1869–1875, jun. 2003.
- MCGUIRE, K. J.; MCDONNELL, J. Stable Isotope Tracers in Watershed Hydrology. In: **Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science: Second Edition**. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd, 2008. p. 334–374.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. **The relationship of drought frequency and duration to time scales**. In: **Proceedings of the Ninth Conference on Applied Climatology**. American Meteorological Society. [s.l.: s.n.].
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. Four billion people facing severe water scarcity. **Science Advances**, v. 2, n. 2, p. e1500323, fev. 2016.
- MELATI, M. D.; FAN, F. M.; ATHAYDE, G. B. Groundwater recharge study based on hydrological data and hydrological modelling in a South American volcanic aquifer. **Comptes Rendus Geoscience**, n. xxxx, p. 1–10, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.crte.2019.06.001>>.
- MELO, D. de C. D.; WENDLAND, E. Shallow aquifer response to climate change scenarios in a small catchment in the guarani aquifer outcrop zone. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 89, n. 1, p. 391–406, maio 2017.
- MELO, D. de C. D.; WENDLAND, E.; GUANABARA, R. C. Estimativa de recarga subterrânea por meio de balanço hídrico na zona não saturada do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 5, p. 1335–1343, 2015.
- MEYBOOM, P. Estimating ground-water recharge from stream hydrographs. **Journal of Geophysical Research**, v. 66, n. 4, p. 1203, 1961.
- MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu

relacionamento com a geodinâmica Fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental. **Curso de Pós-Graduação em Geociências**, n. November 2015, p. 255, 2 vol., 1998.

MILANI, E. J. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: MAANTESSO-NETO, V. et al. (Ed.). **Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Editora Beca, 2004.

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

MORTATTI, J. et al. HYDROGRAPH SEPARATION OF THE AMAZON RIVER USING ^{18}O AS AN ISOTOPIC TRACER. **Scientia Agricola**, v. 54, n. 3, p. 167–173, set. 1997.

MUTZNER, R. et al. Geomorphic signatures on Brutsaert base flow recession analysis. **Water Resources Research**, v. 49, n. 9, p. 5462–5472, 2013.

NATHAN, R. J.; MCMAHON, T. A. Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. **Water Resources Research**, v. 26, n. 7, p. 1465–1473, 1990.

NAZARI, F. et al. Spatial and temporal dynamics of deep percolation, lag time and recharge in an irrigated semi-arid region. **Hydrogeology Journal**, 2018.

NIDIS, N. I. D. I. S. **Climate and Drought Indices in Python** National Drought Mitigation Center, , 2020. . Disponível em: <<https://www.drought.gov/drought/climate-and-drought-indices-python>>. Acesso em: 30 mar. 2020.

NOBRE, C. A. et al. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 08, n. 02, p. 252–262, 2016.

OAS, O. of A. S. Guarani Aquifer: strategic action program. p. 224, 2009. Disponível em: <<https://www.oas.org/DSD/WaterResources/projects/Guarani/SAP-Guarani.pdf>>.

PANG, Z. et al. Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region. **Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology**, v. 63, n. 3, p. 352–359, 2011.

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. .

PARTINGTON, D. et al. Evaluation of outputs from automated baseflow separation methods against simulated baseflow from a physically based, surface water-groundwater flow model. **Journal of Hydrology**, v. 458–459, p. 28–39, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.029>>.

PATNAIK, S. et al. Effect of catchment characteristics on the relationship between past discharge and the power law recession coefficient. **Journal of Hydrology**, v. 528, p. 321–328, 2015.

PCJ, A. das bacias. **Primeira Revisão do Plano das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí 2010 a 2020. Relatório Final. Tomo I - Diagnóstico**. [s.l.] Fundação Agência das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí, 2018a.

- PCJ, A. das bacias. **Relatório da situação dos recursos hídricos 2018: UGRHI 5 bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí**. Piracicaba: Fundação Agência das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí, 2018b.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633–1644, 2007.
- PELLEGRINI, M. et al. Tooth enamel oxygen “isoscares” show a high degree of human mobility in prehistoric Britain. **Scientific Reports**, v. 6, out. 2016.
- PERIOTTO, N. A.; TUNDISI, J. G. A characterization of ecosystem services, drivers and values of two watersheds in São Paulo state, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 78, n. 3, p. 397–407, 2018.
- PFAHL, S.; SODEMANN, H. What controls deuterium excess in global precipitation? **Climate of the Past**, v. 10, n. 2, p. 771–781, abr. 2014.
- QUAGGIO, C. S. et al. Águas Subterrâneas; Hidrogeoquímica; Gestão de Recursos Hídricos. v. 43, p. 176–188, 2020.
- R CORETEAM. **R: A language and environment for statistical computing** Vienna, Austria R Foundation for Statistical Computing, , 2019. .
- RANK, D. et al. Environmental isotope ratios of river water in the Danube basin. **Monitoring isotopes in rivers: Creation of the global network of isotopes in rivers (GNIR)**, p. 13–31, 2012.
- RANK, D. et al. A 50 Years’ isotope record of the danube river water and its relevance for hydrological, climatological and environmental research. **Acta Zoologica Bulgarica**, v. 66, n. SUPPL. 7, p. 109–115, 2014.
- RECKERTH, A. et al. Long-term data set analysis of stable isotopic composition in German rivers. **Journal of Hydrology**, v. 552, p. 718–731, 2017.
- REIS, C. M. dos; et al. Characterization of the waters in Marajo region (PA-Brazil) through O-18 and D concentrations. **Acta Amazonica**, v. v7, n. 2, p. 209–222, 1976.
- RENÉE BROOKS, J. et al. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate. **Nature Geoscience**, v. 3, n. 2, p. 100–104, fev. 2010.
- RISI, C. et al. Can we determine what controls the spatio-temporal distribution of d-excess and 17O-excess in precipitation using the LMDZ general circulation model? **Climate of the Past**, v. 9, n. 5, p. 2173–2193, set. 2013.
- RISI, C.; BONY, S.; VIMEUX, F. Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of precipitation and water vapor in the tropics: 2. Physical interpretation of the amount effect. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. D19, p. D19306, out. 2008.
- ROCHA, R. E. et al. Spatial variations in soil hydraulic conductivity in a Guarani Aquifer System recharge area. **Revista do Instituto Geológico**, v. 40, n. 2, p. 35–51, nov. 2019.
- RODELL, M. et al. The Global Land Data Assimilation System. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 85, n. 3, p. 381–394, mar. 2004.

- ROSS, A. Speeding the transition towards integrated groundwater and surface water management in Australia. **Journal of Hydrology**, v. 567, p. e1–e10, 2018.
- ROSSI, M. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017.
- 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.
- ROZANSKI, K.; ARAGUAS-ARAGUAS, L.; GONFIANTINI, R. Relation Between Long-Term Trends of Oxygen-18 Isotope Composition of Precipitation and Climate. **Science**, v. 258, n. 5084, p. 981–985, 1992.
- SALATI, E. et al. Recycling of water in the Amazon Basin: An isotopic study. **Water Resources Research**, v. 15, n. 5, p. 1250–1258, 1979.
- SANASA, S. de A. de Á. e S. **Diagnóstico do plano diretor do município de Campinas**. [s.l: s.n.].
- SÁNCHEZ-MURILLO, R. et al. Spatial and Temporal Variation of Stable Isotopes in Precipitation across Costa Rica : An Analysis of Historic GNIP Records. v. 2013, n. October, p. 226–240, 2013.
- SÁNCHEZ-MURILLO, R. et al. Baseflow recession analysis in the inland Pacific Northwest of the United States. **Hydrogeology Journal**, v. 23, n. 2, p. 287–303, 2015.
- SÁNCHEZ-MURILLO, R. 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. Isotopic composition in precipitation and groundwater in the northern mountainous region of the Central Valley of Costa Rica. **Isotopes in Environmental and Health Studies**, v. 53, n. 1, p. 1–17, 2017.
- SÁNCHEZ-MURILLO, R.; BIRKEL, C. Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 10, p. 5060–5069, 2016.
- SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M. V; ORELLANA-GONZÁLEZ, A. M. G. Water resources situation at piracicaba, capivari and jundiá watersheds using a dynamic systems model. **Engenharia Agrícola**, v. 29, n. 4, p. 578–590, 2009.
- SANTAROSA, L. V. L. V.; MANZIONE, R. L. R. L. Soil variables as auxiliary information in spatial prediction of shallow water table levels for estimating recovered water volume. v. 23, 2018.
- SANTHI, C. et al. Regional estimation of base flow for the conterminous United States by hydrologic landscape regions. **Journal of Hydrology**, v. 351, n. 1–2, p. 139–153, 2008.
- SANTOS, F. M. dos; DE OLIVEIRA, R. P.; MAUAD, F. F. Evaluating a parsimonious watershed model versus SWAT to estimate streamflow, soil loss and river contamination in two case studies in Tietê river basin, São Paulo, Brazil. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 29, p. 100685, 2020.
- SANTOS, V. dos et al. Variabilidade da Composição Isotópica da Precipitação na Região Central do Estado de São Paulo. **Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 2, p. 171–

181, 2019a.

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

SÃO PAULO, G. do E. de. **Mapa de cobertura da terra do Estado de São Paulo na escala de 1:100.000**. São Paulo: Secretaria de Meio ambiente do Estado de São Paulo, 2010.

SÃO PAULO, G. do E. de. **Situação dos recursos hídricos no Estado de São Paulo: 2015**. 6. ed. São Paulo: Coordenadoria de Recursos Hídricos, 2017.

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

SCARPARE, F. V. et al. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 4576–4584, 20 jan. 2016.

SCHOLL, M. A. et al. Stable-isotope and solute-chemistry approaches to flow characterization in a forested tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico. **Applied Geochemistry**, v. 63, p. 484–497, 2015.

SCHOLL, M. A.; MURPHY, S. F. Precipitation isotopes link regional climate patterns to water supply in a tropical mountain forest, eastern Puerto Rico. **Water Resources Research**, v. 50, n. 5, p. 4305–4322, maio 2014.

SHARMA, A. et al. Oxygen, deuterium, and strontium isotope characteristics of the Indus River water system. **Geomorphology**, v. 284, p. 5–16, 2017.

SILVA, J. A. F. da. **Estimativa de recarga e caracterização hidroquímica e isotópica das águas subterrâneas dos aquíferos da região do canal do Jurubatuba**. 2018. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44138/tde-10092018-140016/>>. Acesso em: 18 ago. 2020.

SILVEIRA, C. S.; CARDOSO, G. O Uso de Isótopos Ambientais em Estudos Hidrogeológicos no Brasil : Uma Resenha Crítica. **Anuario do Instituto de Geociências**, v. 25, p. 25–43, 2002.

SINGH, S. K. et al. Towards baseflow index characterisation at national scale in New Zealand. **Journal of Hydrology**, v. 568, n. November 2018, p. 646–657, 2019.

SMAKHTIN, V. U. Low flow hydrology: A review. **Journal of Hydrology**, v. 240, n. 3–4, p. 147–186, 2001.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. 2. ed. Lisboa: IST Press, 2006.

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

SOULSBY, C. et al. Inferring groundwater influences on surface water in montane catchments from hydrochemical surveys of springs and streamwaters. **Journal of Hydrology**, 2007.

- SOUZA, V.; GALVANI, E. Distribuição Espaço Temporal Da Precipitação Pluvial E Sua Interação Com O Relevo Na Bacia Do Rio Jacaré Guaçu (SP) Temporal and spatial distribution of rainfall and interaction with relief in Jacaré Guaçu watershed (São Paulo State-Brazil). **Ciência e Natura**, v. 39, p. 110–124, 2017.
- STEWART, M.; CIMINO, J.; ROSS, M. Calibration of base flow separation methods with streamflow conductivity. **Ground Water**, v. 45, n. 1, p. 17–27, 2007.
- STEWART, M. K. Promising new baseflow separation and recession analysis methods applied to streamflow at Glendhu Catchment, New Zealand. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 6, p. 2587–2603, 2015.
- STRADIOTO, M. R.; CHANG, H. K. Aquífero Bauru No Estado De São Paulo. v. 34, n. 3, p. 411–422, 2015.
- STUMPP, C.; KLAUS, J.; STICHLER, W. Analysis of long-term stable isotopic composition in German precipitation. **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 351–361, set. 2014.
- TAFFARELLO, D. et al. Modeling freshwater quality scenarios with ecosystem-based adaptation in the headwaters of the Cantareira system, Brazil. **Hydrol. Earth Syst. Sci**, v. 22, p. 4699–4723, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/hess-22-4699-2018>>.
- TALLAKSEN, L. M. A review of baseflow recession analysis. **Journal of Hydrology**, v. 165, n. 1–4, p. 349–370, fev. 1995.
- TANAJURA, D. D. S.; LEITE, C. B. B. Quantificação da vulnerabilidade natural à contaminação das águas subterrâneas da sub-bacia hidrográfica Jacaré-Pepira/SP. **Águas Subterrâneas**, v. 30, n. 3, p. 306, 2016.
- TE CHOW, V. et al. **Hidrologia aplicada**. [s.l.] McGraw-Hill, 1993.
- TERZER, S. et al. Global isoscapes for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in precipitation: Improved prediction using regionalized climatic regression models. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 11, p. 4713–4728, 2013.
- TETZLAFF, D. et al. Conceptualization of runoff processes using a geographical information system and tracers in a nested mesoscale catchment. **Hydrological Processes**, 2007.
- TETZLAFF, D. et al. A preliminary assessment of water partitioning and ecohydrological coupling in northern headwaters using stable isotopes and conceptual runoff models. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 25, p. 5153–5173, 2015a.
- TETZLAFF, D. et al. Tracer-based assessment of flow paths, storage and runoff generation in northern catchments: a review. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 16, p. 3475–3490, jul. 2015b.
- THOMAS, J. M.; ROSE, T. P. Environmental isotopes in hydrogeology. In: Environmental Geology, 5, **Anais...**CRC Press/Lewis Publishers, 2003.
- TJ, C. de B. H. das B. T.-J. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2019: UGRHI 13 bacias dos rios Tietê - Jacaré**. [s.l: s.n.].
- TOBLER, W. R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. **Economic Geography**, v. 46, p. 234, jun. 1970.

- UN, U. N. **The Millennium Development Goals Report 2015**. [s.l.: s.n.].
- VALEZIO, E. V.; PEREZ FILHO, A. Alterações antrópicas e repercussões na dinâmica do rio Jacaré-Pepira (SP). In: **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. 1. ed. [s.l.] UNICAMP, 2017. 1p. 6836–6845.
- VIEIRA, O. J.; SALATI, E. Deuterium and oxygen-18 concentrations in rain and river waters from Minas Gerais, Sao Paulo and Parana States, Brazil. **Ciencia e Pratica**, v. 6, n. 2, p. 171–187, 1982.
- VITVAR, T.; AGGARWAL, P. K.; MCDONNELL, J. J. A Review of Isotope Applications in Catchment Hydrology. In: **Isotopes in the Water Cycle**. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. p. 151–169.
- VOGEL, R. M.; KROLL, C. N. Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics. **Water Resources Research**, v. 28, n. 9, p. 2451–2458, set. 1992.
- VOSS, K. A. et al. Variation of deuterium excess in surface waters across a 5000-m elevation gradient in the east-central Himalaya. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, n. November, p. 1–20, 2018.
- WASSENAAR, L. I.; ATHANASOPOULOS, P.; HENDRY, M. J. Isotope hydrology of precipitation, surface and ground waters in the Okanagan Valley, British Columbia, Canada. **Journal of Hydrology**, v. 411, n. 1–2, p. 37–48, 2011.
- WELSH, K. et al. Isotope hydrology of a tropical coffee agroforestry watershed: Seasonal and event-based analyses. **Hydrological Processes**, v. 32, n. 13, p. 1965–1977, jun. 2018.
- WENDLAND, E.; GOMES, L. H.; TROEGER, U. Recharge contribution to the Guarani aquifer system estimated from the water balance method in a representative watershed. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, n. 2, p. 595–609, 2015.
- 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.
- WINTER, T. C. et al. **Ground water and surface water: A single resource**. [s.l.: s.n.]
- WMO, W. M. O. **Standardized Precipitation Index User Guide**. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO), 2012.
- YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- YAMANAKA, T. et al. How reliable are modeled precipitation isoscapes over a high-relief mountainous region? **Hydrological Research Letters**, v. 9, n. 4, p. 118–124, 2015.
- YANG, K. et al. Spatial and Seasonal Variation of O and H Isotopes in the Jiulong River, Southeast China. **Water**, v. 10, n. 11, p. 1677, 2018.
- ZHANG, J. et al. Evaluating relative merits of four baseflow separation methods in Eastern Australia. **Journal of Hydrology**, v. 549, p. 252–263, 2017a.
- ZHANG, Y. et al. Regression modeling of baseflow and baseflow index for Michigan

USA. **Water (Switzerland)**, v. 5, n. 4, p. 1797–1815, 2013.

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.

ZOMLOT, Z. et al. Spatial distribution of groundwater recharge and base flow: Assessment of controlling factors. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 349–368, 2015.