

## Artigos

# Variabilidade da Composição Isotópica da Precipitação na Região Central do Estado de São Paulo

## Variability of Isotopic Composition of Precipitation in the Central Region of the State of São Paulo

Vinícius dos Santos<sup>1</sup>; Didier Gastmans<sup>1</sup>; Lucas Vituri Santarosa<sup>1</sup>; Ludmila Vianna Batista<sup>1</sup>; Sebastian Balbin Betancur<sup>1</sup>; Marcelo Eduardo Dias de Oliveira<sup>1</sup>; Augusto José Pereira Filho<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista (UNESP), Centro de Estudos Ambientais, Campus Rio Claro.

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo, (USP) Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Departamento de Ciências Atmosféricas, São Paulo, SP.

✉ [vinicius.santos2108@gmail.com](mailto:vinicius.santos2108@gmail.com), [didier.gastmans@unesp.br](mailto:didier.gastmans@unesp.br), [lucasviturisantarosa@gmail.com](mailto:lucasviturisantarosa@gmail.com), [ludvbatista@yahoo.com.br](mailto:ludvbatista@yahoo.com.br), [sebastian-balbin.betancur@gmail.com](mailto:sebastian-balbin.betancur@gmail.com), [dias\\_oliveira@msn.com](mailto:dias_oliveira@msn.com), [augusto.pereira@iag.usp.br](mailto:augusto.pereira@iag.usp.br)

### Palavras-chave:

Isótopos estáveis.  
Precipitação e mudanças climáticas.

### Keywords:

Stable isotopes.  
Precipitation and climate change.

Revisado por pares.  
Recebido em: 22/01/2019.  
Aprovado em: 04/04/2019.

### Resumo

Isótopos estáveis vêm sendo utilizados como ferramenta em estudos hidrometeorológicos, gerando informações sobre a relação entre clima e recarga de águas subterrâneas e origem de fluxos de água superficial, contribuindo para o entendimento das consequências das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico. O presente trabalho apresenta os principais controles climáticos responsáveis pela variabilidade na composição isotópica da precipitação mensal na região central do estado de São Paulo, onde situam-se áreas de recarga de importantes aquíferos da Bacia do Paraná. A equação da reta meteórica local ( $\delta 2H = 8,34 * \delta 18O + 15,71$ ) indica que a composição isotópica é influenciada por uma fonte de umidade oceânica e processos de recirculação de vapor ao longo do deslocamento de massas de ar até a região de estudo. A sazonalidade observada indica que chuvas empobrecidas ( $\delta 18O = <-6\%$ ) ocorrem durante o período chuvoso, associadas a grande disponibilidade de umidade, transportada principalmente da Amazônia, a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e sistemas frontais, enquanto chuvas enriquecidas ( $\delta 18O = >-3\%$ ) ocorrem durante o período seco, com atuação das Frentes Frias (FF) e formação de chuvas convectivas. Os resultados apresentados e discutidos neste trabalho contribuem para o estabelecimento de padrões sazonais na composição isotópica da chuva, que podem auxiliar na compreensão da movimentação da água, o que inclui a recarga de aquíferos, no estado de São Paulo.

### Abstract

Water stable isotopes have been used as a tool in hydrometeorological studies, generating relevant information about the relationship between climate and groundwater recharge as well as determining surface water flows origin, contributing to the understanding of the consequences of climate change on the hydrological cycle. The present work presents the main climatic controls responsible for the variability in the precipitation monthly isotopic composition in the central region of São Paulo state, where areas of recharge of important aquifers of the Paraná Basin are located. Local meteoric water line ( $\delta 2H = 8.34 * \delta 18O + 15.71$ ) indicates that the isotopic composition is influenced by a source of oceanic moisture and vapor recirculation processes along the displacement of air masses over the continent. The observed seasonality indicates that depleted rains ( $\delta 18O = <-6\%$ ) occur during the rainy season, associated to the great availability of humidity, transported mainly from Amazonia, associated with the South Atlantic Convergence Zone (ZCAS) and frontal systems, while enriched rains ( $\delta 18O = >-3\%$ ) occur during the dry period, with the performance of the Cold Fronts (FF) and the formation of convective rains. The results presented and discussed in this paper contribute to the comprehension of seasonal variability in isotopic composition of precipitation, basic information for understanding about water movement, that include aquifer recharge, in state of São Paulo.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v33i2.29474>

## 1. INTRODUÇÃO

Isótopos estáveis de oxigênio ( $^{16}O/^{17}O/^{18}O$ ) e hidrogênio ( $^1H/^2H$ ) presentes na molécula de água, têm sido utilizados como ferramenta auxiliar em estudos hidrometeorológicos, uma vez que ao longo do ciclo hidrológico, durante as mudanças do estado físico da água, uma assinatura isotópica única é registrada, possibilitando a investigação a respeito da origem e movimentação da água, vital no contexto de estudos de interação no sistema atmosfera-hidrosfera, e os possíveis

impactos ocasionados pelas mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica, especialmente nos reservatórios subterrâneos e superficiais.

Sua aplicação é embasada no processo de fracionamento, que altera o conteúdo dos isótopos durante as mudanças do estado físico da água. Desta maneira, os isótopos são diretamente relacionados à variações de parâmetros climáticos, como temperatura (*temperature effect*), quantidade de precipitação (*amount precipitation*), umidade, origem das massas

de ar, tipos de chuva, dentre outros (AGGARWAL *et al.*, 2016; GASTMANS *et al.*, 2017; KURITA, 2013; LACOUR *et al.*, 2018; RISI *et al.*, 2013; SÁNCHEZ-MURILLO, R. *et al.*, 2016).

Desde 1961, um programa de monitoramento global e mensal da composição isotópica da água na precipitação, denominado de GNIP (*Global Network of Isotopes in Precipitation*), vem sendo coordenado pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA – *International Atomic Energy Agency*), em parceria com a Organização Meteorológica Mundial (WMO – *World Meteorological Organization*). Informações a respeito da composição isotópica da precipitação estão disponíveis em um banco de dados aberto, disponível no site da IAEA (<https://nucleus.iaea.org/Pages/GNIPR.aspx>), com o conteúdo dos isótopos ambientais (oxigênio ( $^{18}\text{O}$ ), deutério ( $^2\text{H}$ ) e trítio ( $^3\text{H}$ )) e de dados meteorológicos (precipitação, temperatura, umidade relativa e etc.) de diversas estações espalhadas pelo globo.

Atualmente, com o advento da técnica da Espectroscopia de Absorção Laser (*Laser Absorption Spectroscopy*), a capacidade de determinação de um número maior de amostras, possibilita a aberturas de novas fronteiras para a utilização de isótopos estáveis em estudos hidrológicos e climáticos (WASSENAAR *et al.*, 2014).

Em áreas tropicais, os controles climáticos sobre a variabilidade da composição isotópica da precipitação seguem como uma questão controversa, não sendo completamente explicados pelos efeitos de quantidade (*amount effect*) e de temperatura, como em médias e altas latitudes. Atualmente, grande parte dos estudos apontam para o tipo de chuva, estratiforme e convectiva, como um dos principais fatores responsáveis pela variabilidade isotópica observada na precipitação em áreas tropicais (AGGARWAL *et al.*, 2016; KURITA *et al.*, 2009; LACOUR *et al.*, 2018; RISI *et al.*, 2008).

Deve-se considerar que a compreensão dos processos climáticos responsáveis pela variabilidade da composição isotópica da precipitação contribui para o entendimento da recarga de águas subterrâneas, uma vez que estudos isotópicos da precipitação irão estabelecer valores de referência, como retas meteóricas locais e distribuição sazonal.

No Brasil, diversos estudos que tratam da composição isotópica da precipitação ocorreram a partir da década de 1960, com foco científico na região amazônica (GONFIANTINI, 1981; LEOPOLDO *et al.*, 1982; REIS *et al.*, 1968; SALATI *et al.*, 1979). No entanto, a partir da década de 1980, o monitoramento foi interrompido, o que gerou grande lacuna em estudos de hidrologia isotópica no país. Apenas em 2008, em Belo Horizonte e em 2013, em Rio Claro (SP), estações GNIP voltaram a funcionar no Brasil, e a partir de 2018 se estabelece uma parceria entre o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e a IAEA para a implantação de uma rede de monitoramento da precipitação em território brasileiro.

Deste modo, a avaliação da variabilidade na composição isotópica da precipitação em áreas tropicais, contribui para o debate acerca de como os processos climáticos podem ser incorporados a modelos hidrológicos. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo principal apresentar a variabilidade isotópica da precipitação, com base na coleta de amostras mensais na cidade de Rio Claro, localizada na região central do estado de São Paulo, e discutir como controles climáticos regionais influenciam na variabilidade isotópica observa-

da nessa região.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Estação de coleta e amostragem da precipitação

A coleta da precipitação foi realizada nas dependências do Centro de Estudos Ambientais (CEA) da UNESP campus Rio Claro, situado nas coordenadas  $22^{\circ}39'S$  e  $47^{\circ}54'W$ , entre os meses de fevereiro de 2013 e dezembro de 2017, totalizando 53 amostras.

Rio Claro possui clima subtropical e ou Cwa, de acordo com a classificação climática de Köppen (PEEL *et al.*, 2007), com temperatura média de  $22^{\circ}\text{C}$  e precipitação média anual de 1461mm. Há dois períodos distintos e bem definidos, um seco ocorrendo entre abril e setembro (outono-inverno), e um chuvoso entre outubro e março (primavera-verão).

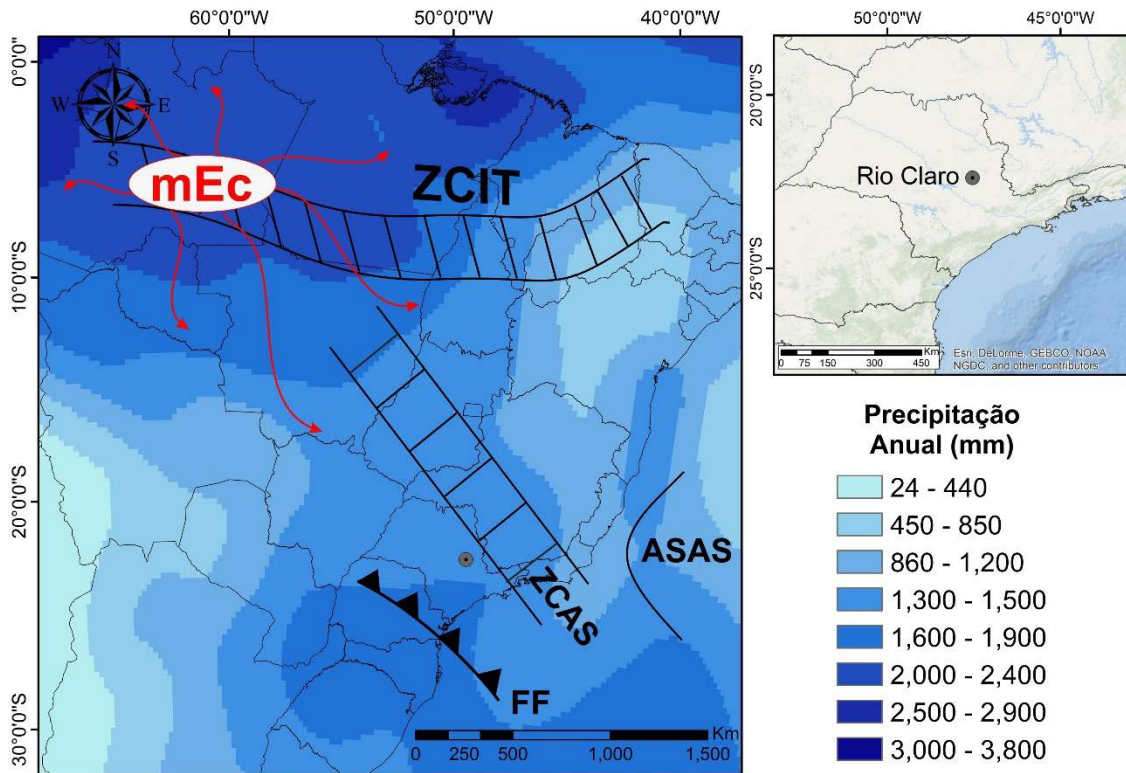
O período seco é caracterizado pela diminuição do volume de chuva, temperaturas amenas, atuação de massas polares, tendo como principal figura climática a atuação de Frentes Frias (FF), e também da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), um sistema de alta pressão, que durante o inverno atua como um bloqueio na formação de chuvas para a região sudeste do Brasil (Figura 1) (REBOITA *et al.*, 2010).

Durante o período chuvoso, há grande disponibilidade de umidade e calor, com volumes de precipitação e temperatura elevados, ocorrendo principalmente a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), uma extensa faixa de nebulosidade, umidade e chuva que se estabelece em uma orientação noroeste-sudeste desde a Amazônia até o litoral sudeste no Oceano Atlântico (Figura 1) (KODAMA, 1992; REBOITA *et al.*, 2010). A influência da umidade proveniente da região amazônica ocorre devido ao importante papel da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que durante o verão está localizada em torno de  $15^{\circ}\text{S}$ , fortalecendo o papel da Massa Equatorial Continental (mEc), que se desloca em direção a região centro-sul do Brasil (Formatting Citation).

Os procedimentos de amostragem da precipitação para a determinação do conteúdo isotópico da água de chuva empregados nesse trabalho, são àqueles recomendados pela IAEA (<https://www.iaea.org/topics/water>) de maneira a garantir a obtenção de dados confiáveis. Foram coletadas amostras mensais da precipitação com um pluviômetro PALMEX (GRÖNING *et al.*, 2012), cujo desenho previne a evaporação. Após a coleta, as amostras foram filtradas em filtro  $0,45\ \mu\text{m}$ , acondicionadas em frascos de vidro de 25mL, com tampa e batoque e armazenadas sob refrigeração antes de serem enviadas ao laboratório.

A determinação das razões isotópicas, foi feita pelo método de Espectroscopia Laser de Cavidade Oca (*Cavity Ring Laser Spectroscopy*), em espectrômetro da marca Los Gatos Research INC, e os resultados expressos em relação ao VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*). Como padrões secundários foram utilizados: USGS-45 ( $\delta^2\text{H} = -10,3\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -2,24\text{‰}$ ), USGS-46 ( $\delta^2\text{H} = -236,0\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -29,80\text{‰}$ ) e um padrão interno (Cachoeira de Emas-CE –  $\delta^2\text{H} = -36,1\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -5,36\text{‰}$ ). Os padrões USGS foram empregados para a normalização dos resultados para VSMOW2-SLAP2, enquanto o padrão CE foi empregado para o controle de qualidade interno e controle de desvios. A precisão analítica foi de  $\pm 1,2\text{‰}$  ( $1\sigma$ ) for  $\delta^2\text{H}$ ,  $\pm 0,2\text{‰}$  ( $1\sigma$ ) for  $\delta^{18}\text{O}$ . Todas as análises foram efetuadas no Laboratório de Hidrogeologia e Hidroquímica do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP-RC.

**Figura 1** – Principais figuras climáticas geradoras de precipitação: durante o verão a Zona de Convergência do Atlântico Sul é um dos principais sistemas atmosféricos atuantes, a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) contribui para o transporte de umidade do oceano para o continente, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) potencializa a atuação da Massa Equatorial Continental (mEc), que transporta ar úmido e quente para a região centro-sul, e as Frentes Frias (FF) mantêm sua atuação. O encontro do ar frio e úmido das FF com o ar quente e úmido proveniente da Amazônia gera sistemas frontais, resultando em grandes volumes de chuva no verão; durante o inverno as incursões de FF são predominantes e a ASAS atua como um bloqueio atmosférico próximo ao litoral, inibindo a formação de chuvas. Valores de Precipitação Anual proveniente do Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation, disponível em: ([http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/global\\_precip/html/wpage.cmap.html](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/global_precip/html/wpage.cmap.html)).



Fonte: Adaptado de Santos et al., (2019).

O excesso de deutério (d), calculado pela equação  $d = \delta^2H - 8 * \delta^{18}O$ , por Dansgaard (1964), é utilizado em estudos de isótopos da precipitação para interpretar condições climáticas associadas à umidade relativa, temperatura do ar, temperatura da superfície do mar, fonte de vapor atmosférico e reevaporação, sendo uma importante ferramenta na determinação de processos durante a formação de chuva, a origem do vapor que origina a chuva e os sucessivos processos de reevaporação e ou recirculação do vapor durante o deslocamento e mistura de massas de ar, além de evaporação parcial de gotas de chuva abaixo da base da nuvem em regiões quentes e secas (DANSGAARD, 1964; FROEHLICH et al., 2002).

## 2.2. Aquisição de dados meteorológicos e determinação das trajetórias HYSPLIT

Os dados meteorológicos (temperatura (média, mínima e máxima), precipitação, pressão de vapor e umidade relativa) foram obtidos junto a estação meteorológica do Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA) do campus na Unesp Rio Claro, situada nas coordenadas de 22° 23'S e 47° 32'W. Para os cálculos de valores históricos de médias anuais e mensais, foi utilizado a série de dados completa desta estação, para o período de janeiro/1994 à dezembro/2017.

Para avaliar a origem de trajetórias das massas de ar na atmosfera que atingem Rio Claro, e que consequentemente

influenciam na composição isotópica da precipitação, foi utilizado o modelo HYSPLIT (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) (STEIN et al., 2015), sistema matemático que calcula trajetórias e faz simulações de dispersão e deposição de partículas na atmosfera ao longo do tempo, usando o banco de dados meteorológico da NOAA FNL. Os dados podem ser obtidos online ([http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT\\_traj.php](http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php)), ou por meio do download do programa no computador.

O modelo utiliza um algoritmo tri-dimensional (*three-dimension Lagrangian algorithm*) para calcular a velocidade da massa de ar e determinar sua posição, informando estes valores a um tempo de resolução de hora em hora ao longo da trajetória (STEIN et al., 2015). Os dados fornecidos e utilizados neste projeto foram: pressão atmosférica (hPa), temperatura potencial (K), temperatura ambiente (K), precipitação (mm per hour), profundidade de mistura (mm) altura do terreno (m), altitude da parcela de ar (m) e entradas de radiação solar da massa de ar monitorada ( $W/m^2$ ). O HYSPLIT também oferece duas possibilidades de cálculos de direção das trajetórias a partir de uma base temporal e de uma determinada coordenada do ponto de coleta e ou interesse. A trajetória *Forward* é calculada em relação ao tempo presente e atual, estimando o deslocamento futuro da partícula, enquanto que a *Backward*, utilizada no presente estudo, calcula trajetórias de tempo passado, uma vez que a precipitação ocorre 10 dias após a evaporação (GIMENO et al., 2010).

Assim, foram determinadas as trajetórias do HYSPLIT com duração de 10 dias anteriores (*backward*) ao evento de chuva coletado, com alturas iniciais no nível de 850 hPa (1.500m), onde concentra-se a maior parte do vapor de água, que pode ser precipitado. Foram elaborados três mapas das trajetórias do HYSPLIT, a partir do range de valores isotópicos, para chuvas empobrecidas, chuvas médias e enriquecidas. Além disso, os mapas apresentam a frequência das trajetórias HYSPLIT, determinada pela somatória do número de vezes que as trajetórias (evento de chuva) passaram sobre uma célula de grade (3°), confeccionados no software ArcGis.

### 2.3. Análise estatística

As razões isotópicas de  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  e excesso de deutério foram associadas aos parâmetros climáticos obtidos junto ao CEAPLA, para aplicação de testes estatísticos. Todas as análises estatísticas foram feitas utilizando-se o software Statistica (StatSoft, Inc, 2013), com nível alfa de significância de 0,05. Foram realizados os testes de variância de Kruskal-Wallis (KRUSKAL&WALLIS, 1952), para testar se há diferença estatística entre anos de amostragem (se o valor de probabilidade p for menor que 0,05 há diferença estatística), teste de correlação Linear de Pearson (PEARSON, 1895), com a matriz de correlação linear.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Variações climáticas durante o período de monitoramento

No período entre fevereiro de 2013 e dezembro de 2017, a precipitação mensal variou de 0mm (julho/2017) a 328,5mm (fevereiro/2015), apresentando volumes distintos em relação às médias históricas. Durante o ano de 2014 os volumes registrados foram 30% abaixo das médias históricas mensais, principalmente nos meses chuvosos de verão (janeiro-fevereiro e novembro-dezembro), registrando um volume anual de 911mm (média histórica de 1461mm). O ano de 2013 foi o mais chuvoso, com volume anual de 1529mm, enquanto os anos de 2015 (1430mm) e 2017 (1462mm) a precipitação foi similar a média

histórica e 2013 ligeiramente inferior (1327mm). Destaque para os anos de 2016 e 2017, em que nos meses chuvosos como fevereiro e novembro foram observados valores bem abaixo das médias históricas mensais, e meses de chuvas diminutas em 2013 e 2016-17, como abril-maio registraram volumes bem acima de suas médias históricas (Figura 2a).

A temperatura média mensal variou de 15,6°C (julho/2016) a 26,3°C (janeiro/2015). Os valores históricos das temperaturas médias mensais são superiores (em até 2,7°C) em grande parte do período de monitoramento (Figura 2b).

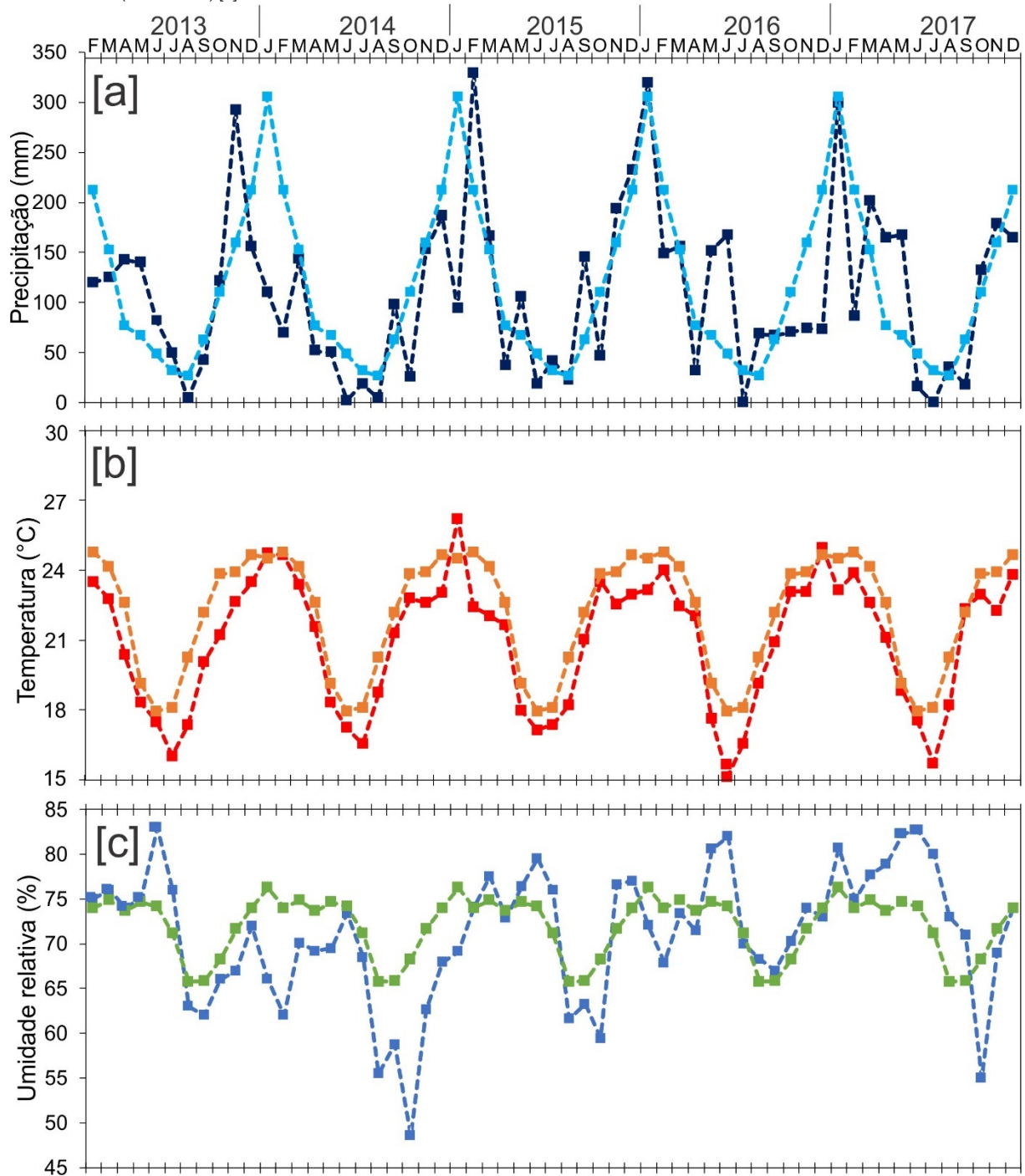
Os valores médios de umidade relativa variaram de 48,5% (outubro/2014) a 83% (junho/2013), com valores históricos superiores em grande parte dos meses durante o período de amostragem, com destaque para valores baixíssimos durante os anos de 2014 e 2017 (Figura 2c).

### 3.2. Variabilidade da composição isotópica da precipitação

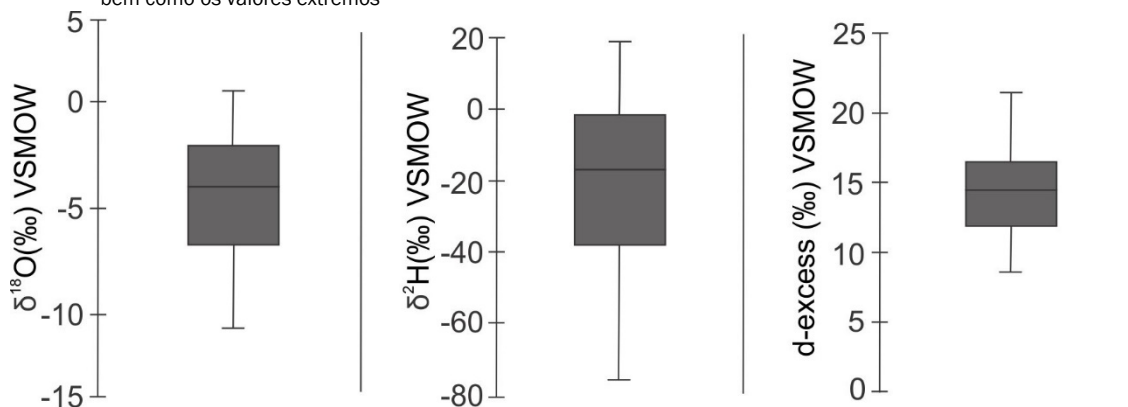
A composição isotópica mensal no período de fevereiro/2013 a dezembro/2017 ( $n=53$ ), variou de -10,76‰ a 0,54‰, com média de  $-4,45 \pm 2,93$ ‰ para o  $\delta^{18}\text{O}$ , de -75,60‰ a 18,80‰, com média de  $-21,42 \pm 24,58$ ‰ para o  $\delta^2\text{H}$  e de 8,46‰ a 21,36‰, com média de  $14,19 \pm 3,19$ ‰, para excesso de deutério (d-excess) (Figura 3). Cerca de 60% das amostras possuem valores de  $\delta^{18}\text{O}$  superiores à média calculada para o período, sendo caracterizadas como chuvas enriquecidas e 40% das amostras possuem valores  $< -4,45$ ‰ (chuvas empobrecidas). Valores de excesso de deutério entre 9‰ e 17‰ ( $13 \pm 2,72$ ‰) são observados em chuvas empobrecidas, e valores entre 8‰ e 21‰ ( $14 \pm 3,37$ ‰) são encontrados em chuvas enriquecidas.

A Reta Meteórica Local (RML 2013-2017) (Figura 4) apresenta inclinação similar à da reta meteórica global com intersecção superior a 10‰, indicando que a composição isotópica da precipitação está principalmente relacionada à processos de recirculação de vapor durante o deslocamento de massas de ar que geram chuva para a região (JOUZEL *et al.*, 2013; RISI *et al.*, 2013; GASTMANS *et al.*, 2017).

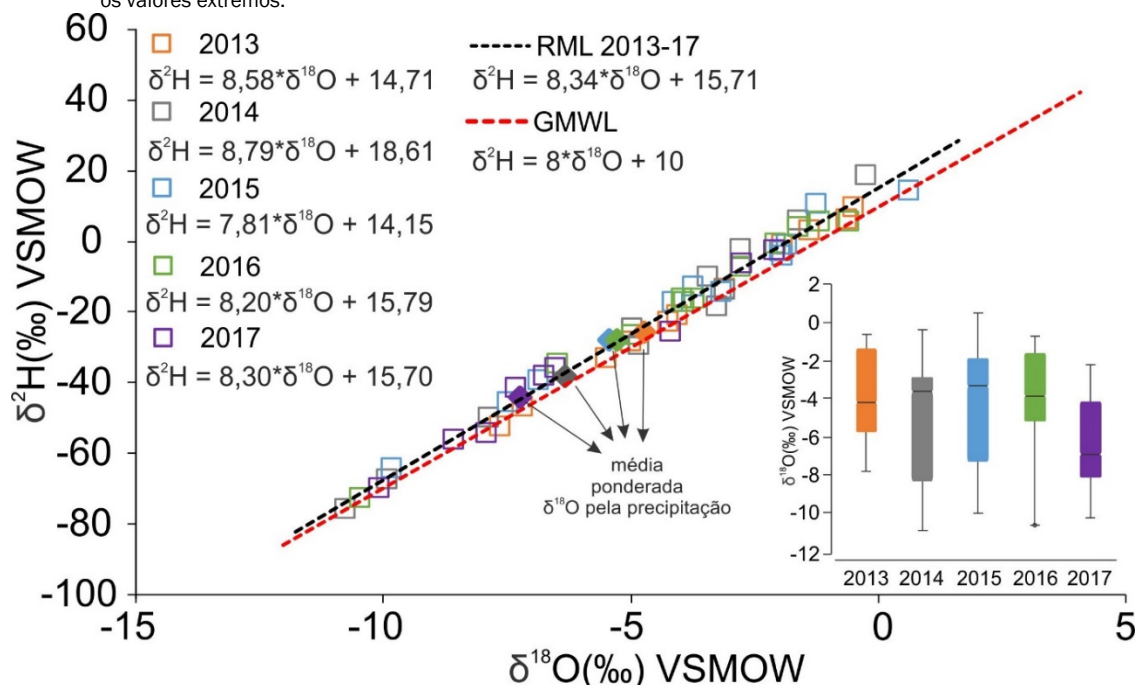
**Figura 2** – Variação mensal dos parâmetros meteorológicos ao longo do período de monitoramento: precipitação mensal (linha azul escuro) e média histórica mensal (linha azul claro) [a]; temperatura média mensal (linha vermelha) e média histórica da temperatura média mensal (linha laranja) [b]; média da umidade relativa do ar (linha azul) e umidade relativa histórica mensal (linha verde) [c].



**Figura 3** – Box-plots mostrando a variabilidade na composição isotópica da precipitação, indicando a média, os percentis (25 e 75%), bem como os valores extremos



**Figura 4** – Retas Meteóricas Locais (RML) em comparação com a Retas Meteóricas Globais (Global Meteoric Water Line – GMWL, em inglês). As equações anuais das RML são apresentadas, bem como os valores anuais das médias ponderadas (destacados no gráfico) e gráfico box-plot com as variações anuais para os valores de  $\delta^{18}\text{O}$ , mostrando as médias anuais, os percentis (25 e 75%) e os valores extremos.



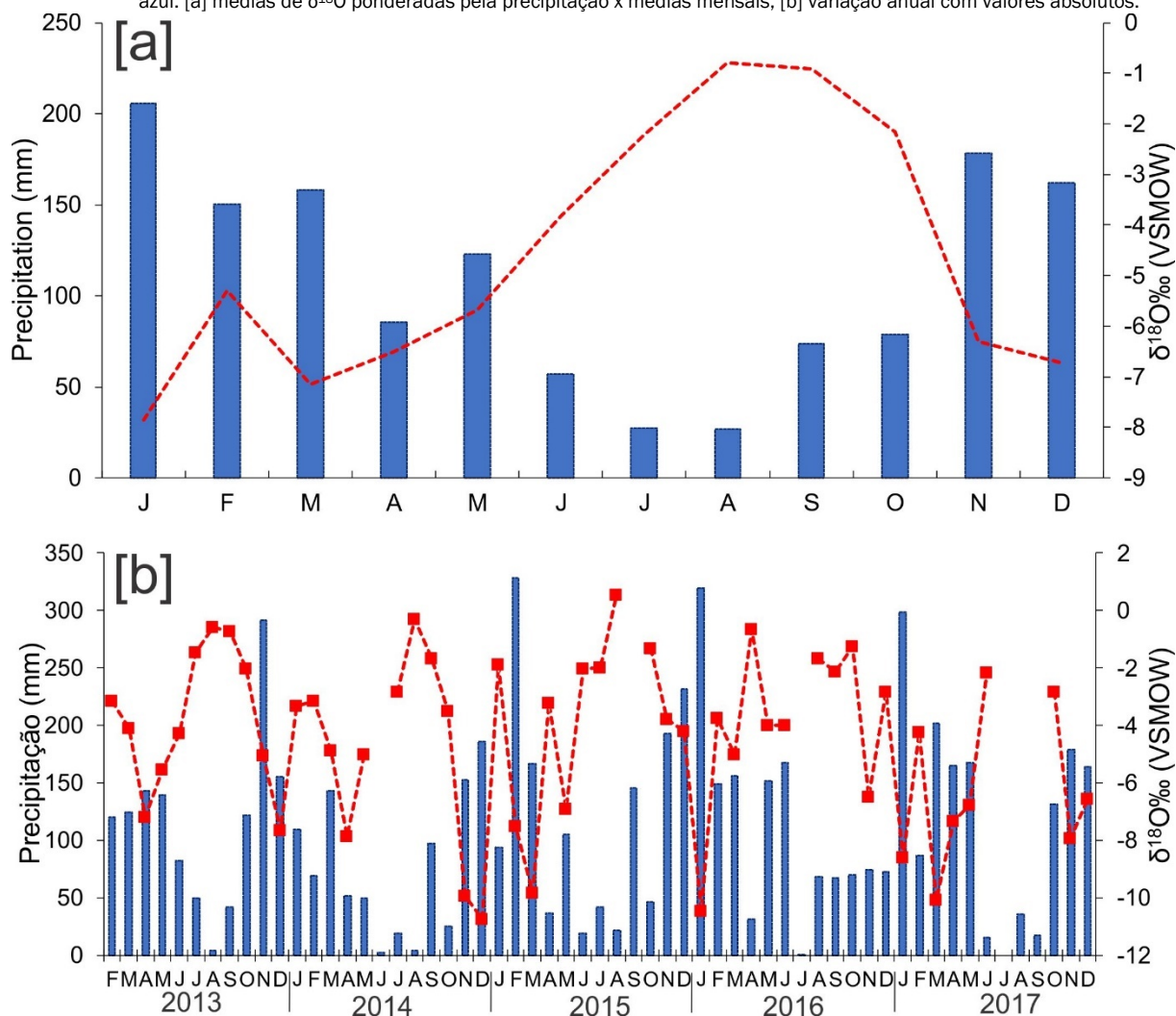
Para variações anuais, as retas meteóricas locais também possuem inclinação similar entre si, e em comparação com a reta global, apenas o ano de 2015 possui valor inferior (Figura 4). As intersecções são ligeiramente distintas, principalmente em 2015, e podem ser associadas às variações climáticas anuais, representando diferenças de umidade disponível e processos de recirculação/incorporação de vapor durante o deslocamento de massas de ar, como demonstrado em Santos *et al.*, (2019), para a mesma área de estudo.

Houve pequena variação na composição isotópica da precipitação entre os anos 2013-2017, com médias ponderadas para os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  maiores nos anos de 2013 (-4,75‰), 2015 (-5,44‰) e 2016 (-5,28‰), enquanto uma tendência a

chuvas mais empobrecidas foi observada nos anos de 2014 (-6,34‰) e 2017 (-7,24‰). A avaliação dos resultados do teste de Kurskal-Wallis, não apontou diferenças estatisticamente significativas entre os anos avaliados ( $p$ -valor = 0,26).

A variabilidade sazonal da composição isotópica da precipitação durante o período de análise, baseada na interpretação dos valores da média ponderada pela precipitação do  $\delta^{18}\text{O}$  (Figura 5a), com exceção dos meses de abril e outubro, aponta valores distintos para os meses secos de maio (-5,69‰) à setembro (-0,91‰) e chuvosos de novembro (-7,60‰) à março (-7,15‰), indicando um possível efeito de sazonalidade (ROZANSKI & ARAGUÁS, 1995; GASTMANS *et al.*, 2017; SANTOS *et al.*, 2019).

**Figura 5** - Variação sazonal da composição isotópica da precipitação: valores de  $\delta^{18}\text{O}$  linha em vermelho e da precipitação coluna em azul: [a] médias de  $\delta^{18}\text{O}$  ponderadas pela precipitação x médias mensais; [b] variação anual com valores absolutos.



Em meses com grande volume de precipitação, acima da média histórica mensal, foram observados os valores mais empobrecidos para o  $\delta^{18}\text{O}$ , como nos meses de janeiro/16 (319mm e  $\delta^{18}\text{O}=-10,47\text{‰}$ ) e março/17 (201mm e  $\delta^{18}\text{O}=-10,09\text{‰}$ ) (Figura 5b). De maneira oposta, nos meses com pequenas taxas de precipitação foram observadas as precipitações mais enriquecidas em  $\delta^{18}\text{O}$ , como 4mm nos meses de agosto/13 e agosto/14, quando a precipitação total não ultrapassou os 4 mm e os valores de  $\delta^{18}\text{O}$  foram de  $-0,57\text{‰}$  e  $-0,32\text{‰}$ , respectivamente (Figura 5b).

Foi observado uma correlação negativa significativa entre as

taxas de precipitação mensal e os valores de  $\delta^{18}\text{O}$ , o que além de corroborar o efeito sazonal demonstrado, aponta para a existência, em escala de observação mensal, do efeito quantidade. O mesmo ocorreu para a temperatura, embora a correlação seja significativa, não é muito alta (tabela 1). Os valores de  $\delta^2\text{H}$  e excesso de deutério, também possuem comportamento semelhante em relação ao efeito sazonal e as correlações com quantidade de chuva e temperatura (tabela 1). Além disso, a excelente correlação entre  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ , demonstra que as amostras e a determinação do conteúdo isotópico vem sendo realizado dentro do preconizado pela IAEA.

**Tabela 1** – Matriz de correlação

	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	d (‰)	Precipitação (mm)	Temperatura (°C)
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	1.00	---	---	---	---
$\delta^2\text{H}$ (‰)	0.99	1.00	---	---	---
d (‰)	0.29	0.41	1.00	---	---
Precipitação (mm)	<b>-0.69</b>	<b>-0.68</b>	<b>-0.22</b>	1.00	---
Temperatura (°C)	<b>-0.26</b>	<b>-0.28</b>	<b>-0.22</b>	0.36	1.00

Correlação significativa:  $p = <0.05$ 

#### 4.DISCUSSÃO

As condições climáticas distintas ocorridas em 2014, especialmente durante a estação chuvosa, podem ser explicadas pela atuação de um bloqueio atmosférico, provocado por um sistema de alta pressão que inibia a ação dos sistemas geradores de chuva, principalmente a atuação da ZCAS durante o verão (COELHO et al., 2016).

Durante os anos de 2015, 2016 e 2017, a variabilidade na composição isotópica da precipitação pode ser atribuída a atuação do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), com a ocorrência de um El Niño entre novembro de 2014 a março de 2016 e de uma La Niña de agosto-dezembro de 2017, no entanto os efeitos do ENOS ainda não são muito bem esclarecidos para a região Sudeste (COELHO et al., 2002), que é caracterizada como uma zona de transição entre regiões onde há aumento da precipitação (Sul do Brasil) e diminuição da mesma (Central/Nordeste/Norte), com ocorrência de severas secas, durante a fase de El Niño (COELHO et al., 2002).

No trabalho de Santos et al., (2019), uma avaliação com dados diários para os El Niños de 1997-98 e 2014-16, revelou um efeito sazonal na composição isotópica da precipitação em Rio Claro, com valores empobrecidos ( $\delta^{18}\text{O} = -5,4\text{‰}$ ) sendo observados durante a estação chuvosa, e enriquecidos ( $\delta^{18}\text{O} = -2,8\text{‰}$ ) durante a estação seca, associado principalmente a diferenças na umidade disponível na atmosfera.

A variabilidade interanual das condições climáticas não refletiu em grandes diferenças na composição isotópica da precipitação entre os anos de monitoramento, como apresentado pelos valores médios de  $\delta^{18}\text{O}$ , pelas retas meteóricas locais

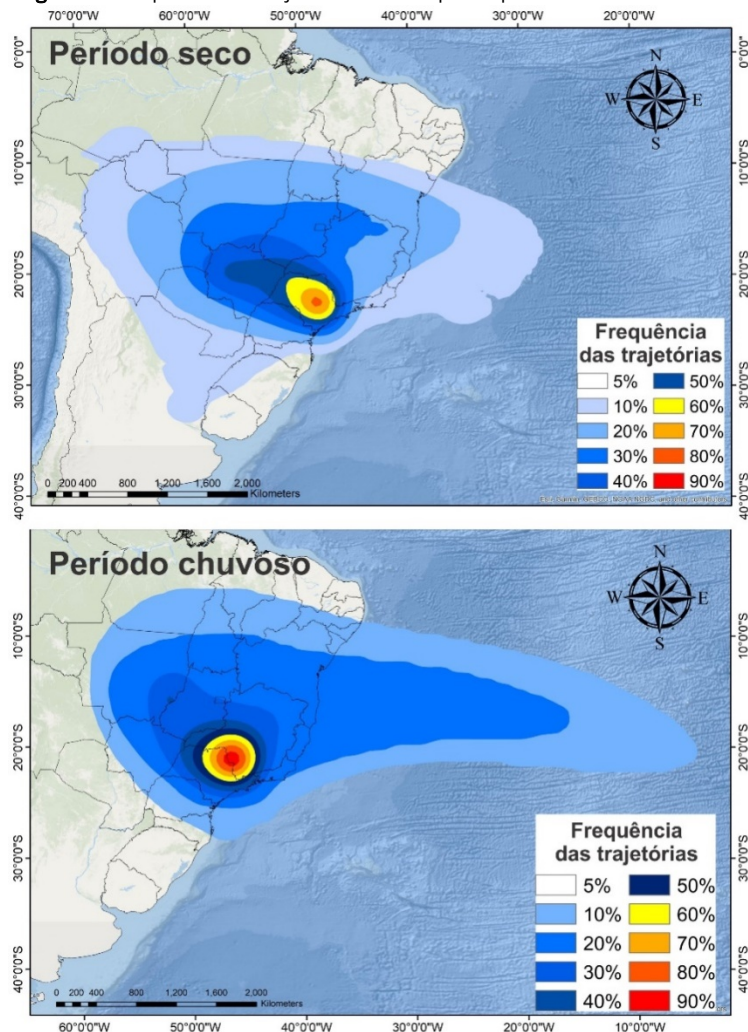
anuais e teste estatístico. A exceção ao ano de 2014, cuja diminuição na umidade disponível, principalmente proveniente da Amazônia, dos eventos de ZCAS, e volume de precipitação (COELHO et al., 2016; SANTOS et al., 2019), resultaram em processos de incorporação de vapor nas massas de ar em uma atmosfera mais seca, onde na formação da chuva as trocas isotópicas geraram valores de  $\delta^{18}\text{O}$  mais empobrecidos, explicando o elevado valor da intersecção da reta local.

Os valores superiores das intersecções das retas locais, revelam grande importância dos processos de re-evaporação e ou reincorporação de vapor nas massas de ar que geram chuva para área de estudo. Como a fonte de umidade é sempre o Oceano Atlântico (principalmente nos meses de verão) (Figura 5), a distribuição espacial do transporte de umidade é a principal componente no efeito sazonal na composição isotópica da precipitação.

Deste modo, durante o período seco há uma diminuição do transporte de umidade do oceano para o continente, devido a diminuição das temperaturas sob o continente, o papel da ASAS e a atuação de massas polares (NIMER, 1966; REBOITA et al., 2010). Assim, grande parte das massas de ar são originadas na região NE-SE do Brasil (Figura 5), há uma diminuição no fornecimento da umidade Amazônica, e conseqüentemente menor influência dos processos de re-evaporação proporcionados pela frondosa vegetação da floresta. A diminuição do fluxo de umidade amazônica, ocorre devido atuação da ASAS, que inibe a ocorrência de chuvas no Sudeste. Assim, as chuvas são provocadas principalmente devido às incursões de frentes frias, com a formação de chuvas convectivas, resultando em precipitações mais enriquecidas (valores médios:  $\delta^{18}\text{O} = -3.32\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -11.77\text{‰}$  e  $d = 14.85\text{‰}$ ).



**Figura 5** – Frequência das trajetórias HYSPLIT para o período seco e chuvoso



No período chuvoso, as temperaturas são elevadas, formando zonas de baixa pressão sob o continente, criando condições para o aumento do transporte de umidade do oceano para o continente (NIMER, 1966; REBOITA *et al.*, 2010). A umidade proveniente da Amazônia tem um papel importantíssimo para a formação de chuva na área de estudo (Figura 5), os processos de re-evaporação proporcionados pela floresta influenciam na reincorporação de vapor das massas de ar, que combinados com a atuação da ZCAS, a formação de sistemas frontais e de chuvas estratiformes, resultam em chuvas mais empobrecidas (valores médios:  $\delta^{18}\text{O} = -5.38\text{‰}$ ,  $\delta^2\text{H} = -29.41\text{‰}$  e  $d = 13.64\text{‰}$ ).

Durante o período de monitoramento, foram observadas para os meses de abril (em 2013 e 2017) chuvas mais empobrecidas e para outubro (2014, 2015 e 2016) chuvas mais enriquecidas, não seguindo o efeito de sazonalidade na composição isotópica. Esta exceção pode ser explicada devido ao diferente regime de chuva nestes meses durante o período de monitoramento estudado, como apresentado na análise das médias ponderadas da precipitação. Enquanto abril (mês de período seco) os volumes de chuva (média mensal de 84 mm) foram acima da média histórica (76 mm), nos meses de outubro (mês de período chuvoso), os volumes registrados (média mensal de 79mm) foram bem abaixo da média histórica de 110 mm, corroborando a importância da quantidade de precipitação na avaliação mensal da composição isotópica.

A forte correlação negativa ( $r = -0.69$ ) entre o volume de precipitação mensal e a composição isotópica da precipitação, indica a existência do efeito de quantidade na composição isotópica. No entanto, para áreas tropicais há dificuldade de entendimento deste efeito principalmente em escala diária de monitoramento (DANSGAARD, 1964; CLARK & FRITZ, 1997; RISI *et al.*, 2008; KURITA *et al.*, 2009; AGGARWAL *et al.*, 2016; GASTMANS *et al.*, 2017; SÁNCHEZ-MURILLO *et al.*, 2017).

A escala de monitoramento também é um fator importantíssimo para a discussão em estudos de isótopos da precipitação, resultando em diferenças na interpretação deste efeito e nos fatores que o governam (KURITA *et al.*, 2009). Em monitoramentos mensais, o efeito de quantidade é potencializado, devido a um efeito de atenuação de valores extremos, ou seja, o valor da razão isotópica mensal representa o somatório (mescla) de eventos de chuva, enquanto a coleta diária registra um evento isolado.

Como demonstrado por Gastmans *et al.*, (2017) e Santos *et al.*, (2019), em trabalhos anteriores para a mesma área de estudo, com monitoramento diário, as correlações entre volume de chuva e a composição isotópica são fracas não ocorrendo o efeito de quantidade, sendo este governado por outros fatores, associado a fonte de umidade, diferentes sistemas atmosféricos e tipos de chuva. Esta diferença na escala de monitoramento também é percebida na comparação dos valores de excesso de deutério entre as estações chuvosas e secas.

Na avaliação mensal processos de evaporação que podem ocorrer abaixo da base da nuvem (*sub cloud evaporation*) (LANDAIS *et al.*, 2010), não são perceptíveis, uma vez que a somatória de eventos acumulados mascara esse registro na assinatura isotópica.

O efeito de temperatura sobre a composição isotópica da precipitação não pode ser considerado para área de estudo, apesar da fraca correlação ( $r = -0.26$ ), durante o período de monitoramento estudado, as médias de temperatura mensais não ultrapassaram 7 °C ao longo do ano.

## 5. CONCLUSÃO

A composição isotópica da precipitação mensal está associada a processos de recirculação de vapor, durante o deslocamento de massas de ar que transportam umidade para chuva ser formada em Rio Claro, como demonstrado pela reta teórica local ( $\delta^2H = 8,34 * \delta^{18}O + 15,71$ ).

Estes processos de recirculação ocorrem em diferentes condições ao longo do ano, resultando em uma variabilidade sazonal da composição isotópica da precipitação, com chuvas empobrecidas ( $\delta^{18}O = <-6\%$ ) ocorrendo durante o período chuvoso e chuvas enriquecidas ( $\delta^{18}O = >-3\%$ ) durante o período seco.

As chuvas empobrecidas são formadas devido aos processos de recirculação de vapor em condições de grande disponibilidade de umidade e calor, favorecendo intensa troca isotópica durante o transporte de umidade proveniente da Amazônia, com o estabelecimento da ZCAS, que encontra as incursões de FF, formando sistemas frontais e gerando empobrecimento isotópico. As chuvas enriquecidas são formadas em condições inferiores de umidade disponível, com as trocas isotópicas ocorrendo em uma atmosfera mais seca, o transporte de umidade da Amazônia diminui e as FF atuam favorecendo a formação de chuvas convectivas.

O padrão sazonal demonstrado pela precipitação mensal revela uma importante fonte de informação e conhecimento a ser utilizado em estudos sobre a movimentação da água em ambientes continentais. Inclusive os que envolvam a compreensão da recarga de águas subterrâneas, uma vez que o sinal isotópico da precipitação compõe a assinatura isotópica da água subterrânea. Isto pode auxiliar na compreensão de como os processos hidrológicos na atmosfera podem refletir nos processos superficiais e subterrâneos, possibilitando a realização de modelos hidrológicos mais robustos.

## AGRADECIMENTOS

A realização desse trabalho foi possível graças à concessão de auxílio científico (Processos 2015/15749-2 e 2018/06666-4) e de bolsa de estudos ao primeiro autor (Processo nº 2016/18735-5), por parte da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), bem como da Agência Internacional de Energia Atômica, por meio do Projeto Coordenado de Pesquisa (CRP 19747), intitulado "Stable isotopes in precipitation and paleoclimatic archives in tropical areas to improve regional hydrological and climatic impact models". Agradecemos aos Profs. Drs. Pedro Reginato e Stela Cota pela condução do processo de revisão, bem como a ao revisor anônimo pelos valiosos comentários que nos ajudaram a melhorar a versão final deste manuscrito.

## REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, P. K.; ROMATSCHKE, U.; ARAGUAS-ARAGUAS L.; LONGSTAFEE, F. J.; BERG P.; SCHUMACHER, C.; FUNK, A. Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. *Nature Geoscience*, v. 9, n. 8, p. 624–629, 2016.
- CLARK, I.; FRITZ, P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. First ed. Boca Raton: CRC Press, 1997. p. 343.
- 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, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-015-1540-9>.
- COELHO, C. A. S.; UVO, C. B.; AMBRIZZI, T. Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 71, p. 185–197, 2002. Disponível em: <https://link.springer.com.ez87.periodicos.capes.gov.br/content/pdf/10.1007%2Fs007040200004.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2018.
- DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, v. 16, n. 4, p. 436–468, 1964. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3402/tellusa.v16i4.8993>.
- GASTMANS, D.; SANTOS, V.; GALHARDI, J.A.; GROMBONI, J.F.; BATISTA, L. V.; MIOTLINSKI, K.; CHANG, H. K.; GOVONE, J. S. 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. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10256016.2017.1305376>.
- GIMENO, L.; DRUMOND, A.; NIETO, R.; TRIGO, R. M.; STOHL, A. On the origin of continental precipitation. *Geophysical Research Letters*, v. 37, n. 13, p. 1–7, 2010.
- GONFIANTINI, R. On the isotopic composition of precipitation in tropical stations. *Acta Amazonica*, v. 15, n. n.1-2, p. 121–140, 1981. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/aa/v15n1-2/1809-4392-aa-15-1-2-0121.pdf>.
- JOUZEL, J.; DELAYGUE, G.; LANDAIS, A.; MASSON-DELMOTTE, V.; RISI, C.; VIMEUX, F. Water isotopes as tools to document oceanic sources of precipitation. *Water Resources Research*, v. 49, n. 11, p. 7469–7486, 2013.
- KODAMA, Y. Large-scale common features of subtropical precipitation zones ( the Baiu Frontal Zone , the SPCZ , and the SACZ ) Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, v. 70, n. 4, p. 813–836, 1992.
- KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, v. 47, n. 260, p. 583–621, 1952.
- KURITA, N. *et al.* The relationship between the isotopic content of precipitation and the precipitation amount in tropical regions. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 102, n. 3, p.

- 113–122, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2009.03.002>.
- KURITA, N. Water isotopic variability in response to mesoscale convective system over the tropical ocean. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 118, n. 18, p. 10376–10390, 2013.
- LACOUR, J. L.; RISI, C.; WORDEN, J.; CLERBAUX, C.; COHEUR, P. F. Importance of depth and intensity of convection on the isotopic composition of water vapor as seen from IASI and TES  $\delta D$  observations. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 481, p. 387–394, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.10.048>.
- LANDAIS, A.; RISI, C.; BONY, S.; VIMEUX, F.; DESCROIX, L.; FALOURD, S.; BOUYGUES, A. Combined measurements of  $^{17}O$  excess and d-excess in African monsoon precipitation: Implications for evaluating convective parameterizations. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 298, n. 1–2, p. 104–112, 15 set. 2010. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012821X10004711>.
- LEOPOLDO, PAULO R.; MATSUI, EIICHI; SELATI, ENEAS; FRANKEN, WOLFRAM; RIBEIRO, M. N. G. Composição isotópica da água de chuva e do solo em floresta amazônica do tipo terra firme, região de Manaus (\*). *Acta Amazonica*, v. 12, n. 1, p. 7–13, 1982.
- NIMER, E. Circulação atmosférica do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia*, p. 48–66, 1966. Disponível em: <http://abclima.ggf.br/arquivos/obrasclimatologia/24/Edmon Nimer 1966.pdf>.
- PEARSON, K. 1895. Contributions to the Mathematical Theory of Evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 91: 343–358.
- 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.
- REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-77862010000200004&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862010000200004&lng=pt&tlng=pt).
- REIS, CARLOS M.; TANCREDI, ANTONIO C. F. N. S.; MATSUI, EIICHI; SALATI, E. Caracterização das águas da região de Marajó através de concentrações de  $O-18$  e  $D$ . *Acta Amazonica*, v. 7, n. 2, p. 209–222, 1968.
- RISI, C.; BONY, S.; VIMEUX, F. Influence of convective processes on the isotopic composition ( $\delta^{18}O$  and  $\delta D$ ) of precipitation and water vapor in the tropics: 2. Physical interpretation of the amount effect. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 113, n. 19, p. 1–12, 2008.
- RISI, C.; NOONE, D.; FRANKENBERG, C.; WORDEN, J. Role of continental recycling in intraseasonal variations of continental moisture as deduced from model simulations and water vapor isotopic measurements. *Water Resources Research*, v. 49, n. 7, p. 4136–4156, 2013.
- ROZANSKI, K.; ARAGUÁS, L. A. Spatial and temporal variability of stable isotope composition of precipitation over the South American continent. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, v. 24, n. 3, p. 379–390, 1995.
- SALATI, ENEAS; DALL'OLIO, ATTILIO; MATSUI, EIICHI; GAT, J. R. Recycling of Water in the Amazon Basin: An Isotopic Study. *Water Resources Research*, v. 15, n. 5, p. 1250–1258, 1979. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/WR015i005p01250>.
- 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.; BIRKEL, C.; WELSH, K.; ESQUIVEL-HERNÁNDEZ, G.; CORRALEZ-SALAZAR, J.; BOLL, J.; BROOKS, E.; ROUPSARD, O.; SÁENZ-ROSALES, O.; KATCHAN, I. Tropical precipitation anomalies and d-excess evolution during El Niño 2014–16. *Hydrological Processes*, v. 31, n. 4, p. 956–967, 2017.
- SANTOS, V.; OLIVEIRA, M. D.; BOLL, J.; SÁNCHEZ-MURILLO, R.; MENEGÁRIO, A., A.; GOZZO, L. F.; GASTMANS, D. Isotopic composition of precipitation during strong El Niño – Southern Oscillation events in the Southeast Region of Brazil. *Hydrological Processes*, v. 33, n. p. 647–660, 2019. DOI: [doi.org/10.1002/hyp.13351](https://doi.org/10.1002/hyp.13351)
- STEIN, A. F.; DRAXLER, R. R.; ROLPH, G.D.; STUNDER, B. J. B.; COHEN, M. D.; NGAN, F. NOAA's Hysplit atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 96, n. 12, p. 2059–2077, 2015.
- TAVARES, ANTONIO CARLOS; SILVA, A. C. F. Urbanização, chuvas de verão e inundações: uma análise episódica. *Climatologia e Estudos da Paisagem Rio Claro*, v. 3, n. 1, p. 39–60, 2008.
- WASSENAAR, L. I.; COPLEN, T. B.; AGGARWAL, P. K. Approaches for Achieving Long-Term Accuracy and Precision of  $\delta^{18}O$  and  $\delta^2H$  for Waters Analyzed using Laser Absorption Spectrometers. *Environmental Science & Technology*, v. 48, p. 1123–1131, 2014.