



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



Trabalho de Graduação
Curso de Graduação em Geografia

Controles climáticos sobre a variação temporal da composição isotópica na região central do estado de São Paulo

Discente: Rafaela Rodrigues Gomes

Orientador: Prof. Dr. Didier Gastmans

Coorientador: Me. Vinícius dos Santos

Rio Claro (SP)
2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

Rafaela Rodrigues Gomes

Controles climáticos sobre a variação temporal da composição isotópica na região central do estado de São Paulo

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

Rio Claro - SP

2022

G633c

Gomes, Rafaela Rodrigues

Controles climáticos sobre a variação temporal da composição isotópica na região central do estado de São Paulo / Rafaela Rodrigues Gomes. -- Rio Claro, 2022
37 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado e licenciatura - Geografia) -
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio
Claro

Orientador: Didier Gastmans

Coorientador: Vinícius dos Santos

1. Isótopos. 2. Precipitação. 3. Circulação atmosférica. 4. Climatologia. 5.
Geociências. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

RAFAELA RODRIGUES GOMES

Controles climáticos sobre a variação temporal da composição isotópica na região central do estado de São Paulo

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

Comissão Examinadora

Didier Gastmans

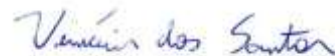
Anderson Luís Hebling Christofolletti

Cenira Maria Lupinacci

Rio Claro, 07 de março de 2022



Assinatura do orientador



Assinatura do coorientador



Assinatura da aluna

RESUMO

Isótopos estáveis de oxigênio ($^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$) e hidrogênio ($^1\text{H}/^2\text{H}$) presentes na molécula de águas são usados como ferramenta para análise climática, pois podem auxiliar na obtenção de informações hidrometeorológicas em relação à origem e formação dos eventos de chuva. Sendo assim, cada evento de chuva é influenciado por parâmetros climáticos relacionados a fonte do vapor e trajetória da precipitação. Tendo vista a necessidade de estudos da temática em zonas tropicais, o regime de precipitação da Região Sudeste se caracteriza por ser um excelente campo de pesquisa, pois reflete a natureza dinâmica dos sistemas atmosféricos que são impulsionados pelas diferenças climáticas entre a zona equatorial e a zona polar. Nesse sentido, o presente estudo apresentou 192 amostras (Fev/2014 – Dez/2020) com frequências semanais de dados meteorológicos de superfície e da composição isotópica da precipitação. Arelado aos dados obtidos, a origem e trajetórias das massas de ar que geraram as chuvas ao longo do intervalo temporal fora determinada a partir da utilização do HYSPLIT, que possibilitou a geração de mapas temáticos. Os softwares Microsoft Excel© e BioEstat v.5.0© foram utilizados para verificar quais parâmetros climáticos possuem influência na composição isotópica da precipitação, possibilitando a execução de uma série de testes e gráficos estatísticos. Com a análise, foi possível considerar que as chuvas com maior conteúdo de isótopos leves (empobrecidas) são relacionadas à estação chuvosa e são fortemente influenciadas pela recirculação de vapor na região amazônica, com origem em latitudes próximas ao Equador. Enquanto as chuvas com maior conteúdo de isótopos pesados (enriquecidas), ocorrem com maior frequência na estação seca e apresentam trajetórias que passam pela região centro-sul do Brasil e origens localizadas no Atlântico Sul.

Palavras-chave: Isótopos estáveis. Precipitação. Modelagem climática.

ABSTRACT

Stable isotopes of oxygen ($^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$) and hydrogen ($^1\text{H}/^2\text{H}$) in the water molecule are used as a tool for climate analysis, because they can help to obtain hydrometeorological information about the origin and formation of rain events. Therefore, each rain event is influenced by climatic parameters related to the steam source and precipitation trajectory. Given the need for studies on the subject in tropical zones, the singular regime that affect the Southeast region is an excellent research field, since it reflects the dynamic of atmospheric systems that are driven by climatic differences between the equatorial zone and the polar zone. According to those lines, the present study consists in 192 samples of surface meteorological data and the isotopic composition, weekly sampled from Feb/2014 to Dec/2020. Along with the data obtained, the origin and trajectories of the air masses that generated the rainfall over the time interval were provided from HYSPLIT, which enabled the generation of thematic maps. Microsoft Excel © and BioEstat v.5.0 © software were used to verify which climatic parameters influence the isotopic composition of the precipitation, based on a series of tests and statistical graphs. With the analysis, it was possible to consider that rainfall with light isotopes is related to the rainy season and is strongly influenced by steam recirculation in the Amazon region, originating in latitudes close to the Equator. While the rains with heavy isotopes occur more frequently in the dry season and present trajectories that pass through the central-southern region of Brazil and origins located in the South Atlantic.

Keywords: Stable Isotopes. Precipitation. Climate Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comportamento dos isótopos frente aos processos de mudança da fase da água	15
Figura 2. Distribuição da composição isotópica da precipitação no globo	17
Figura 3. Sistemas atmosféricos que regem a precipitação na região Sudeste do Brasil	19
Figura 4. Localização do município de Araraquara/SP	20
Figura 5. Trajetórias HYSPLIT 2014-2016	29
Figura 6. Trajetórias HYSPLIT 2017-2019	30
Figura 7. Trajetórias HYSPLIT 2020	31

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Variação anual de temperatura e precipitação	24
Gráfico 2. Variação mensal de temperatura e precipitação	25
Gráfico 3. Composição isotópica sazonal	26
Gráfico 4. Composição isotópica mensal	27
Gráfico 5. Variabilidade anual da composição isotópica	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise estatística do intervalo temporal	25
Tabela 2. Análise estatística das trajetórias HYSPLIT	28

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ZCAS: Zona de Convergência do Atlântico Sul.

ZCIT: Zona de Convergência Intertropical.

ASAS: Alta Subtropical do Atlântico Sul.

FF's: Frentes Frias.

d-excess: Excesso de Deutério.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. ISÓTOPOS AMBIENTAIS NA PRECIPITAÇÃO COMO FERRAMENTA PARA COMPREENSÃO CLIMÁTICA	13
2.1 Isótopos ambientais	13
2.2 Composição isotópica da precipitação em áreas tropicais	17
2.3 Caracterização climática da Região Sudeste	18
2.4 Sistemas atmosféricos que geram precipitação no Sudeste	18
2.5 Fenômeno ENSO	19
3. METODOLOGIA	20
3.1 Amostragem de precipitação e determinação do conteúdo de isótopos	20
3.2 Aquisição de dados meteorológicos	21
3.3 Determinação das trajetórias do modelo HYSPLIT	22
3.4 Análise estatística	23
3.5 Mapas temáticos	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1 Variação dos parâmetros climáticos	24
4.2 Análise da composição isotópica da precipitação	25
4.3 Trajetórias do HYSPLIT	28
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1. INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico é um sistema que envolve a movimentação da água no planeta Terra a partir de processos que alteram o estado físico da água, como evaporação e condensação. As partículas de água presentes na atmosfera, fruto da evaporação das águas oceânicas e continentais, se desloca na atmosfera, refletem condições climáticas que fora submetida em seu trajeto. Distante, ou não, da fonte do vapor, a umidade pode estar submetida ao processo de condensação, que pode provocar precipitação em alguma localidade. O estudo da composição isotópica da precipitação permite a compreensão dos parâmetros climáticos que envolvem as mudanças físicas da água em sua trajetória na atmosfera. Face as mudanças climáticas, é de extrema importância a prospecção de modelagens de circulação geral da atmosfera cada vez mais robustas, que possam oferecer subsídios para compreensão do clima global.

Isótopos estáveis constituintes da molécula da água, oxigênio ($^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$) e hidrogênio ($^1\text{H}/^2\text{H}$), têm sido utilizados como ferramenta em estudos hidrometeorológicos, oferecendo informações relevantes a respeito de fenômenos e processos climáticos (GALEWSKY *et al.*, 2016; SÁNCHEZ-MURILLO *et al.*, 2016). A utilização dos isótopos estáveis de hidrogênio e oxigênio na compreensão dos controles exercidos por fatores climáticos sobre a precipitação está relacionado ao processo de fracionamento isotópico, que faz com que cada evento de precipitação tenha uma composição isotópica única, que funciona como uma “impressão digital” da água (CLARK & FRITZ, 1997). Essa assinatura isotópica pode ser diretamente relacionada às variações de parâmetros climáticos, como temperatura, quantidade de precipitação, origem das massas de vapor, tipos de chuva, dentre outras, proporcionando dessa forma uma associação entre as condições climáticas e os isótopos da precipitação (AGGARWAL *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2019a; PFAHL & SODEMANN, 2014).

Devido à complexidade climática das áreas tropicais, esforços são realizados para compreender as relações isotópicas clássicas entre temperatura (*temperature effect*) e precipitação (*amount precipitation*) com a composição isotópica da chuva, porém ainda é uma questão não completamente solucionada (ROZANSKI *et al.* 1993). Diversos autores apresentam mecanismos e correlações que podem explicar as variações observadas, como mudanças na composição isotópica da precipitação associadas a fonte de vapor da precipitação (JOUZEL *et al.*, 2013), destilação das massas de ar durante o seu transporte (ISHIZAKI *et al.*, 2012), reciclagem da água por processos de troca na superfície terrestre (WINNICK *et al.*, 2014), sistemas atmosféricos de grande escala formadores de chuva (SANTOS ET AL., 2019A; SÁNCHEZ-MURILLO *et al.*, 2016), associação com eventos relacionados a fenômenos

atmosféricos-oceânicos, El Niño Oscilação Sul (ENOS) (MOERMAN *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2019b), aos processos que ocorrem durante a queda das gotas de chuva (SRIVASTAVA *et al.*, 2012) e mais recentemente a atuação de processos convectivos (AGGARWAL *et al.*, 2016).

A área de estudo, localizada na Região Sudeste, corresponde a *um* excelente campo de pesquisa na compreensão da distribuição isotópica da precipitação. Isso porque, devido a posição latitudinal, os sistemas atmosféricos na região possuem natureza dinâmica, pois são impulsionados pelas diferenças climáticas entre a zona equatorial e a zona polar. O Sudeste possui um regime de precipitação único, com considerável luminosidade no céu e elevadas temperaturas (DANNI-OLIVEIRA, I. M., & MENDONÇA, F., 2007; CAVALCANTI, I. F., 2016). Os sistemas atmosféricos que geram chuva na Região estão associados às zonas de baixas pressões (equatoriais e subpolares), marcados pela atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), Massas de ar Equatorial, Tropical, Polares e as Frentes Frias (TAVARES, ANTONIO CARLOS; SILVA, 2008; FLANTUA *et al.*, 2016).

A relação entre fenômenos climáticos e a composição isotópica da precipitação é capaz de fornecer informação que pode ser utilizada em modelos de circulação geral da atmosfera (LACOUR *et al.*, 2018; RISI *et al.*, 2013; VUILLE, 2003), em que isótopos estáveis são utilizados como parâmetros de calibração, especialmente na modelagem dos processos que ocorrem entre o sistema superfície-atmosfera, incluindo os mecanismos físicos essenciais dos processos de fracionamento isotópico da molécula de água, possibilitando a realização de estudos paleoclimáticos e modelos de projeção, desvendando o funcionamento da dinâmica climática e melhorando os modelos de previsões hidrometeorológicas.

Deste modo, pretende-se identificar quais fatores climáticos, locais ou regionais, são responsáveis pela variabilidade da composição isotópica da precipitação na região de estudo, a partir de uma gama de dados isotópicos, assim como, dados meteorológicos de superfície e atmosfera utilizados em testes estatísticos e análises sinópticas.

A partir deste estudo, busca-se responder as seguintes indagações: A análise das trajetórias a partir do Modelo Hysplit poderia indicar a trajetória das chuvas de diferentes sinais isotópicos? Quais são os principais parâmetros climáticos responsáveis pela variação na composição isotópica da precipitação na região central do estado de São Paulo?

Em suma, a presente pesquisa investiga o comportamento isotópico da precipitação relacionado aos parâmetros climáticos presentes no percurso dos eventos de chuva. A partir

disto, buscou-se promover um arcabouço teórico para estudos paleoclimáticos e modelos de projeção, assim como, desvendar o funcionamento da dinâmica climática e melhorar os modelos de previsões hidrometeorológicos em diferentes escalas de análise.

2. ISÓTOPOS AMBIENTAIS NA PRECIPITAÇÃO COMO FERRAMENTA PARA COMPREENSÃO CLIMÁTICA

2.1 Isótopos ambientais

Os isótopos são átomos de um elemento químico que possuem o número atômico idêntico. A diferença existente na massa atômica os confere a maior parte de suas propriedades químicas. Dentre os isótopos estáveis (àqueles que não se transformam em outros elementos), o oxigênio ($^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$) e o hidrogênio ($^1\text{H}/^2\text{H}$) são moléculas utilizadas em estudos hidrológicos, logo, também se caracterizam como “isótopos ambientais”, visto que estão inseridos no ciclo da água.

Os isótopos ambientais estão distribuídos no ciclo hidrológico em diferentes concentrações. O hidrogênio, cujo isótopo mais abundante com massa 1 (^1H) corresponde à 99,985%, e é acompanhado por 0,015% do isótopo mais pesado, ^2H ou deutério (D). Já em relação aos dois isótopos pesados e estáveis de oxigênio, ^{17}O e ^{18}O , têm abundâncias de 0,037% e 0,20% respectivamente. (MOOK, 2002). Em decorrência das razões entre os isótopos serem muito diminutas (para $^{18}\text{O}/^{16}\text{O} = 0,00204$ e para $^2\text{H}/^1\text{H} = 0,015$), convencionou-se a calcular a abundância ou razão isotópica (R) para expressar esses valores, definida como:

Equação 1:

$$R = \frac{\textit{abundância do isótopo raro}}{\textit{abundância do isótopo abundante}}$$

Tendo em vista os contrastes nas proporções dos diferentes isótopos, adotou-se a notação delta (δ) e os valores são estabelecidos seguindo o padrão de referência VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean), com o valor $\delta=0$ na escala VSMOW. Para representação dos resultados isotópicos, convencionou-se multiplicar por mil (‰). Desta forma, os valores adquiridos nos principais estudos de hidrologia isotópica, utilizando o exemplo do oxigênio, são expressos através da seguinte fórmula (CRAIG, 1961; DANSGAARD, 1964):

Equação 2:

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

Em decorrência do processo de mudanças de fase no ciclo da água (Figura 1), os isótopos apresentam variações nas proporções ao longo do ciclo hidrológico. Nesse processo, a transição de um determinado elemento de um estado físico ou químico a outro faz com que cada evento de precipitação tenha uma composição isotópica única, atribuindo a estes uma “impressão digital” da água (CLARK & FRITZ, 1997). A distribuição isotópica relacionada a mudança de fase no ciclo da água refere-se ao fracionamento isotópico, que ocorre em qualquer reação termodinâmica devido às diferenças nas taxas de reação para diferentes espécies moleculares. O resultado é uma concentração desproporcional de um isótopo sobre o outro em um lado da reação. (CLARK & FRITZ, 1997). Destaca-se que o fenômeno do fracionamento ocorre a partir de 3 processos relacionados a massa: Termodinâmico, Cinético e Fracionamento de transporte durante os processos difusos.

A partir disto, considera-se que a distribuição dos isótopos leves e pesados estão relacionados aos processos físicos no ciclo da água. Portanto, a evaporação da chuva oceânica, reevaporação, acumulação e derretimento de neve e gelo e escoamento superficial está relacionada a distribuição isotópica em diferentes regimes climáticos. Cada etapa deste ciclo divide oxigênio e hidrogênio entre os diferentes reservatórios de água doce (CLAK & FRITZ, 1997).

Figura 1. Comportamento dos isótopos frente aos processos de mudança da fase da água.



Fonte: SANTOS (2019c).

A fim de compreender a dinâmica do fracionamento nas águas meteóricas, CRAIG (1961), identificou uma relação entre os isótopos de oxigênio ($^{18}O/^{16}O$) e hidrogênio ($^2H/^1H$). A partir da correlação estabelecida através do estudo realizado da composição isotópica da água em zonas climáticas distribuídas pelo globo, a relação estabelecida é expressa através de uma reta linear global, denominada de Linha ou Reta Meteórica Global (GMWL sigla em inglês):

Equação 3:

$$\delta D = 8 * \delta^{18}O + 10$$

Tal correlação estabelecida pela reta meteórica global permite análises comparativas para estudos hidrológicos. A inclinação 8 da reta corresponde a um parâmetro para amostras de outros estudos, que podem ser superiores ou inferiores a esta. As amostras com valores ≤ 8 indicam enriquecimento isotópico, associadas a processos Rayleigh, governados principalmente pela temperatura (CRAIG, 1961). Já o valor de 10 na GMWL, representa um importante componente na análise de águas meteóricas, denominado excesso de deutério (d-excess), calculado através da seguinte equação (DANSGAARD, 1964):

Equação 4:

$$d \text{ excess} - d = \delta D - 8 * \delta^{18}O$$

Os valores de d-excess demonstram uma medida das proporções relativas de ^{18}O e 2H contidos na água, relacionadas às condições físicas da área de origem da precipitação, assim

como, parâmetros climáticos presentes durante a evolução e interação ou mistura de massas de ar a caminho do local de precipitação. (FROEHLICH; GIBSON; AGGARWAL, 2002). Entre as condições físicas, podemos citar: umidade, temperatura do ar, temperatura da superfície do mar, fonte de vapor atmosférico e re-evaporação.

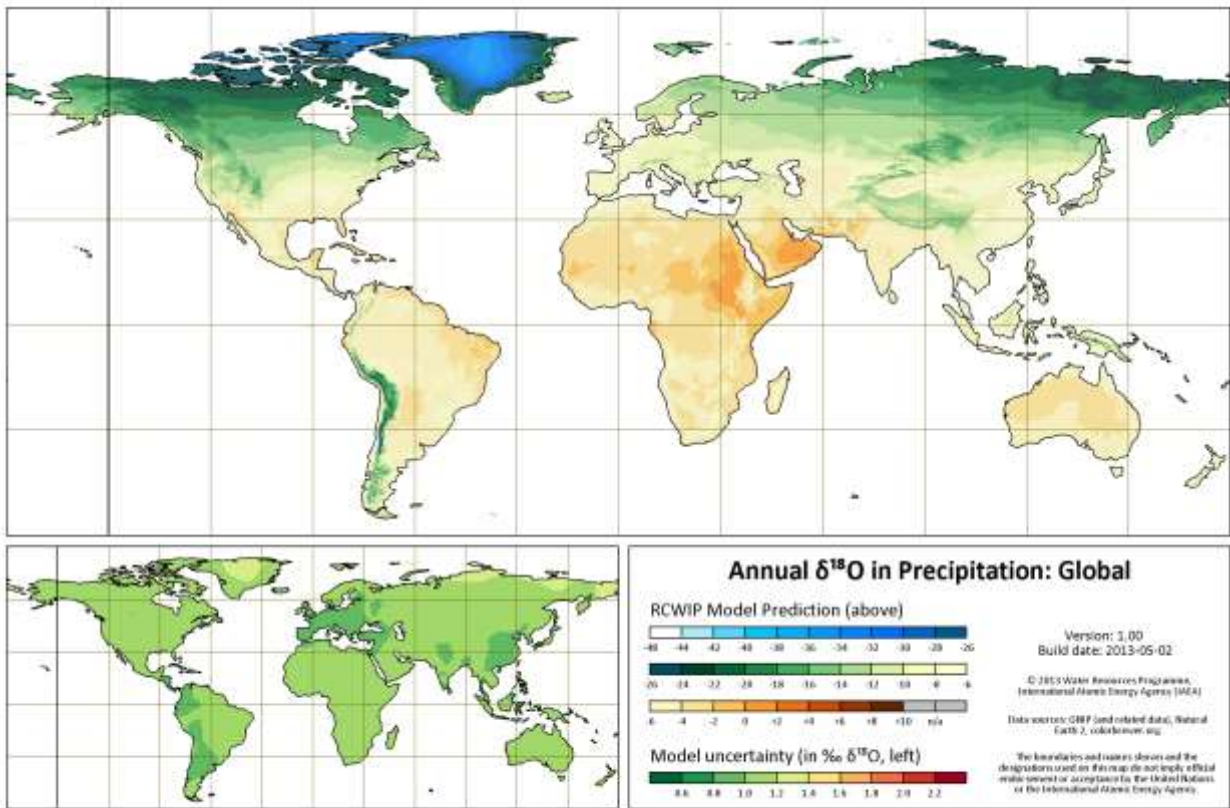
Tendo em vista que os processos de fracionamento são responsáveis pelas variações espaciais e temporais na composição dos isótopos da água, que por sua vez, estão ligados à combinação de efeitos climáticos como temperatura ambiente, quantidade de precipitação, velocidade do vento e umidade (SANTOS, 2019a), muitos estudos são realizados a fim de compreender a relação dos efeitos isotópicos no clima.

Nesse sentido, DANSGAARD, em 1964, identificou alguns padrões de elementos e fatores climáticos relacionados a distribuição isotópica: latitude e altitude, continentalidade, sazonalidade, temperatura (*temperature effect*) e quantidade de precipitação (*amount effect*). Segundo Dansgaard (1964), para os efeitos da temperatura, o padrão de distribuição isotópica é relacionado aos processos atmosféricos de evaporação e condensação. Para a quantidade de precipitação, o padrão de distribuição isotópica relaciona-se a umidade, quantidade e duração de chuva em um dado evento.

Cabe destacar também os estudos de ROZANSKI *et al.*, em 1993, que a partir da utilização de dados das estações da rede IAEA (Agência Internacional de Energia Atômica) e da WMO (Organização Meteorológica Mundial) contribuiu para a compreensão da distribuição isotópica em variadas zonas climáticas.

A partir do arcabouço teórico gerado por estes autores, pode-se estabelecer alguns padrões ambientais e geográficos. De maneira geral, os valores enriquecidos são localizados na zona equatorial, tornando-se mais empobrecidos em direção aos polos (Figura 2). Isso ocorre devido a diminuição da temperatura do ar, pois o fracionamento isotópico está inteiramente relacionado a temperatura (SANTOS, 2018).

Figura 2. Distribuição da composição isotópica da precipitação no globo.



Retirado de: http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_rcwip.html

2.2 Composição isotópica da precipitação em áreas tropicais

Apesar do arcabouço teórico gerado, a relação entre a assinatura isotópica da precipitação e o clima em regiões tropicais é menos compreendida se relacionada com o conhecimento tido sobre regiões temperadas e polares. Estudos em regiões tropicais indicam que a relação entre o sinal isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ na precipitação é influenciado por uma combinação de fatores, além da correlação convencional dos isótopos pesados e “efeito quantidade”, entre estes: temperatura, variabilidade da fonte de umidade e mudanças na circulação atmosférica (ROSANSKI et al. 1993; VUILLE, 2003). Destaca-se também estudos que averigam processos de larga escala e de pequena escala, e de fatores regionais e locais na dinâmica climática na Região (SANTOS *et al.*, 2019a; SANTOS et al 2019b; GASTMANS, 2017, YANG, 2019).

Com enfoque em área tropical, SANTOS (2019b) estabelece a relação entre as chuvas empobrecidas (com maior conteúdo de isótopos mais leves) e os processos de recirculação de vapor em uma atmosfera com grande umidade disponível (Bacia Amazônica). Tal correlação

ocorre durante a estação de verão. O oposto ocorre com as chuvas de inverno, que carregam isótopos pesados (enriquecidas). Estes eventos ocorrem durante um período de menor disponibilidade de umidade do Oceano Atlântico e diminuição do fluxo de evapotranspiração da Bacia Amazônica, além da diminuição das temperaturas de superfície continental e incursões de FF e formação de chuvas convectivas.

2.3 Caracterização climática da Região Sudeste

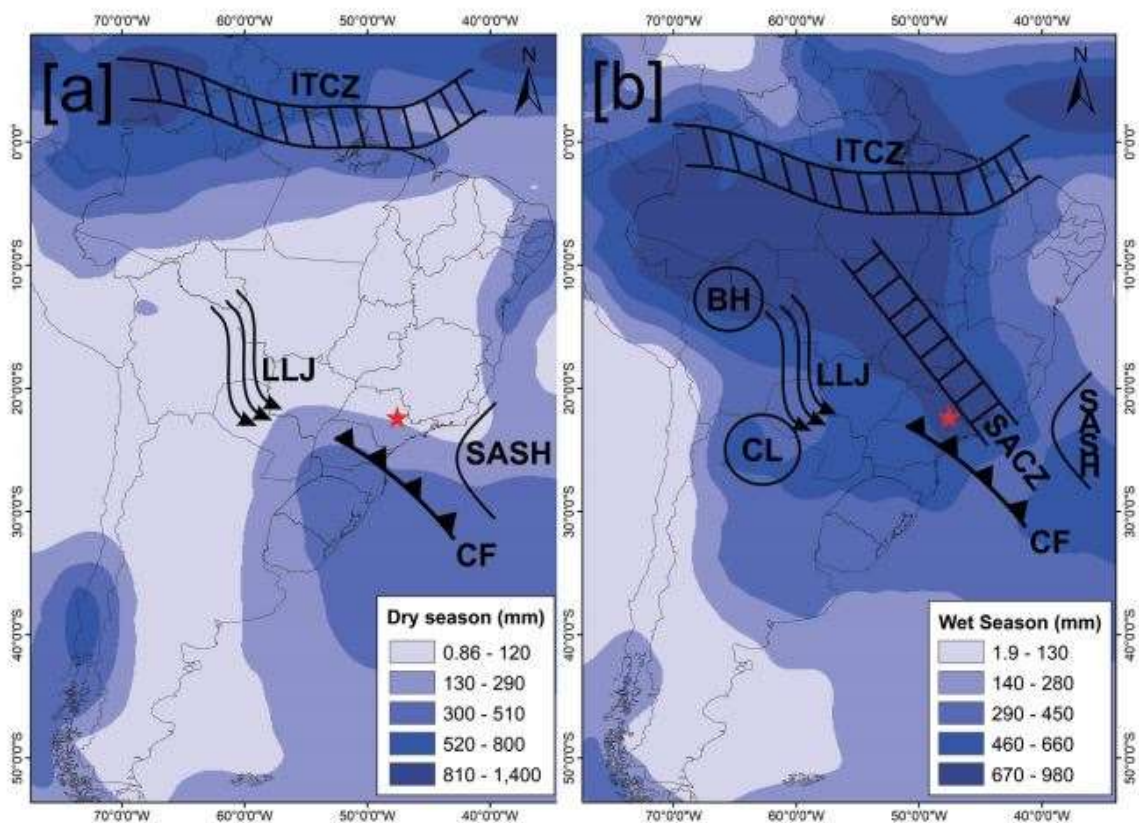
O clima predominante na Região Sudeste do Brasil refere-se ao clima subtropical Cwa (PEEL *et al.*, 2007), com duas estações marcantes: chuvosa e seca. A estação chuvosa (Primavera e Verão) se estende por 6 meses (Out-Nov-Dez-Jan-Fev-Mar), período em que há uma acentuada elevação das temperaturas médias e máximas diárias e intensificação das precipitações abundantes, com predomínio da atuação das frentes frias e da ZCAS. Já a estação seca (Outono e Inverno), compreende os meses de Junho a Novembro, com temperaturas mais baixas e menor volume de precipitação e predomínio das frentes frias e massas polares. Na Região, os totais pluviométricos são máximos no verão e mínimos no inverno (REBOITA, 2010).

2.4 Sistemas atmosféricos que geram precipitação no Sudeste

No verão Austral, ou seja, na estação chuvosa (Fig. 3), o Hemisfério Sul recebe mais radiação e o aquecimento superficial na Região contribui para o rebaixamento da Zona de Convergência Tropical (ZCIT). A faixa de nebulosidade equatorial evidencia o deslocamento da umidade do Oceano Atlântico para a bacia Amazônica através dos ventos alísios, assim como, a ocorrência de evapotranspiração da floresta. Ao encontrar a barreira dos Andes, a umidade faz um giro e alcança a Alta da Bolívia (AB), um sistema anticiclônico relacionado à intensa liberação de calor latente proveniente da convecção amazônica e a um intenso aquecimento sobre o Antiplano Boliviano abaixo de 500hPa (REBOITA, 2010; PALLOTTA, 2010). A umidade, então, conflui da AB para a Baixa do Chaco (BC), com a atuação dos Jatos de Baixo Níveis (JBN). O Anticiclone do Atlântico Sul (ASAS), se encontra mais afastado do continente nesse período do ano, portanto, o escoamento da umidade de origem amazônica e a passagem das frentes frias (FF's) contribuem para a entrada de umidade no Sudeste. Com a interação desses sistemas atmosféricos, a Zona de Convergência Intertropical (ZCAS), uma faixa de nebulosidade bem-marcada e orientada Noroeste-Sudeste, é responsável por grande quantidade de chuva Região.

No inverno, estação seca (Figura 3), com a migração da ZCIT para o Hemisfério Norte, diminui-se a disponibilidade de umidade na bacia amazônica. O período seco é marcado pela aproximação do Anticiclone do Atlântico Sul (ASAS) contribui para menor ocorrência de precipitação no Sudeste, já que é responsável por deslocar a umidade que alcançaria a Região. A precipitação na estação chuvosa é derivada da passagem de FF's, pois, com a maior radiação em latitudes menores, as FF's possuem maior energia no inverno. Cabe destacar que apesar da aproximação da ASAS no continente, a dinâmica de escoamento que ocorre no período chuvoso permanece, apesar de menos intenso e sem a presença da ZCAS no Sudeste.

Figura 3. Sistemas atmosféricos que regem a precipitação na região Sudeste do Brasil.



Retirado de: de SANTOS *et al.* 2019 (a).

2.5 Fenômenos ENSO

As alterações de temperatura no Oceano Pacífico contribuem para alteração do escoamento de umidade no Sudeste, a partir da diferença de temperatura entre o Oceano e o continente e das diferenças de pressão derivadas do aumento da temperatura oceânica (El Niño) ou de sua diminuição (La Niña). Pode-se considerar que os efeitos desses fenômenos impactam em análises hidrometeorológicas interanuais.

Durante um episódio de El Niño (EN), a Região de circulação anômala ciclônica nos subtropicais da AS contribui para um gradiente de pressão entre esta e a Amazônia, desta forma aumenta-se o transporte de calor nos JBN a leste dos Andes, favorecendo a convecção e precipitação no Sudeste (PEREIRA & REBOITA, 2017). Os reflexos do EN também consistem no enfraquecimento dos ventos alísios e, conseqüentemente, na diminuição de vapor disponível sobre a Amazônia, sendo mais evidentes no inverno e mais amplificado durante a primavera. Já, durante um episódio de La Niña (LN), espera-se o “oposto”, ou seja, o aumento dos ventos alísios e do vapor disponível sobre a região amazônica, assim como, a diminuição dos JBN e, conseqüentemente, de precipitação no Sudeste. (MARENGO, 1998).

3. METODOLOGIA

3.1 Amostragem de precipitação e determinação do conteúdo de isótopos

As amostras de chuva foram coletadas entre fev/2014-dez/2020, utilizando-se um amostrador passivo (GRÖNING *et al.*, 2012). O ponto de coleta se está inserido no município de Araraquara/SP (-21°47'40”S e -48°10'32”O) (Figura 4), localizado na região central do estado de São Paulo. A escolha do local se deve à presença de equipamentos que possibilitaram o monitoramento das condições atmosféricas em uma área que apresente bastante variabilidade pluviométrica e vulnerabilidade ambiental.

Figura 4. Localização do município de Araraquara/SP.



A fim de garantir a obtenção de resultados confiáveis, a determinação do conteúdo isotópico das amostras foi realizada a partir das recomendações da agência IAEA (<http://www.iaea.org/water>), evitando-se o fracionamento associado a evaporação da amostra. As amostras foram filtradas em filtro 0,45 µm, acondicionadas em frascos de polietileno de alta densidade de 25mL, com tampa e batoque, de maneira a prevenir a evaporação secundária, e armazenadas sob refrigeração antes de serem enviadas ao laboratório.

A determinação das razões isotópicas foi feita por meio do método de Espectrometria Laser (Cavity Ring Laser Spectroscopy) 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 V-SMOW2-SLAP2, enquanto o padrão CE foi empregado para o controle de qualidade interno e controle de desvios. A precisão analítica foi de $\pm 1,2 \text{‰}$ (1σ) para $\delta^2\text{H}$, $\pm 0,2 \text{‰}$ (1σ) para $\delta^{18}\text{O}$. As análises foram efetuadas no Laboratório de Hidrogeologia e Hidroquímica do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP-RC.

3.2 Aquisição dos dados meteorológicos

Dados meteorológicos diários de superfície (Temperatura, Pressão Atmosférica, Umidade e Precipitação) foram coletadas por uma estação meteorológica DEACGON instalada junto ao coletor. Para uma análise integrada dos elementos climáticos e composição isotópica, foi realizada uma média aritmética dos dados de temperatura e umidade para cada amostra de $\delta^{18}\text{O}$ com frequência semanal.

Para a análise sinótica, dados de Reanalysis foram obtidos junto ao National Center for Environmental Prediction (NCEP) e National Center for Atmospheric Research (NCAR), que possibilitam a geração de mapas temáticos (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>) de séries temporais diárias de umidade específica (kg kg⁻¹), água precipitável (kg m⁻²) e taxa de precipitação (mm dia⁻¹), ambos a 850 hPa, campo de velocidade vertical (Pa s⁻¹) a 500 hPa e campo de vento horizontal a 850 hPa e 200 hPa (m s⁻¹), gerados para os eventos de precipitação amostrados.

3.3 Determinação das trajetórias do modelo HYSPLIT

A origem e trajetórias das massas de ar que geraram as chuvas foram determinadas com a utilização do HYSPLIT (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*). O modelo Hysplit é um sistema matemático capaz de calcular trajetórias simples e simulações complexas de transporte, dispersão, transformação química e deposição de partículas presentes em parcelas de ar. A partir de uma base temporal, o programa oferece uma modelagem atmosférica e um banco de dados meteorológicos do NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Os dados podem ser obtidos online (http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php), ou por meio do download do programa no computador.

O método utilizado no HYSPLIT compreende um referencial móvel para os cálculos de advecção e difusão conforme as parcelas de ar se deslocam de sua localização inicial (chamado de abordagem Lagrangian), assim como, confere uma grade tridimensional (metodologia Euleriana) para calcular a velocidade da massa de ar e determinar sua posição. Ou seja, o método permite além do cálculo das trajetórias, também as simulações da movimentação das partículas na atmosfera ao longo do tempo.

Em relação a direção das trajetórias, o HYSPLIT oferece duas possibilidades a partir da inserção da coordenada do local de estudo e uma base temporal. A trajetória Forward é usada com objetivo de prever o deslocamento da partícula, sendo assim, requer a inserção da data presente para o cálculo do percurso. Já a trajetória Backward, é usada para determinar a origem das massas de ar e estabelecer relações fonte-receptor. A modelagem atmosférica neste caso representa a trajetória de tempo passado. Esta última fora a escolhida para a presente pesquisa, tendo em vista que a precipitação ocorre de 8 a 10 dias após a evaporação (GIMENO *et al.*, 2021).

Sendo assim, foram determinadas as trajetórias do HYSPLIT com duração de 10 dias anteriores (Backward) ao evento de chuva coletado, com altura de 850 hPa (1500m), onde concentra-se a maior parte do vapor de água. Os dados meteorológicos utilizados com a finalidade de complementar os adquiridos pela estação meteorológica são: Pressure (Pressão), Pot.Temp (Temperatura potencial), A. Temp., Prec. Tj, Mix depth, RH (Umidade Relativa), Solar Rad (Radiação solar).

3.4 Análise estatística

A análise estatística foi realizada tendo como variáveis dependentes as razões isotópicas das amostras de $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ e excesso de deutério (d-excess). A mensuração do conteúdo isotópico e dos parâmetros climáticos foi realizada utilizando o software Microsoft Excel©, BioEstat v.5.0© e o programa R© para tabulação do arranjo de dados, como demonstrada por meio dos gráficos estatísticos.

Foram utilizados os modelos de Estatística Descritiva, a fim de classificar os dados isotópicos nos eventos de precipitação ao longo da escala temporal. Para a descrição geral, os percentis foram considerados a partir de todas as amostras do recorte temporal. Já para a realização dos mapas temáticos, os percentis foram considerados de acordo com cada ano analisado.

O teste de variância Kruskal-Wallis (KRUSKAL, 1952), um teste não-paramétrico, foi utilizado para comparar a magnitude das variações entre os anos a fim de incorporar à análise climática a ser discutida. O teste de Shapiro Wilk (SHAPIRO & WILK, 1965) foi incorporado no estudo para compreensão da destruição normal (ou anormal) dos dados.

Para analisar o conteúdo dos isótopos estáveis foram considerados: a utilização da reta meteórica global (GMWL) associada às retas meteóricas locais (LMWL) para a compreensão da distribuição isotópica de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ e processos de evaporação, e o excesso de deutério (d-excess), utilizado para verificar a ocorrência de processos atmosféricos evaporativos ou de recirculação de vapor disponível.

3.5 Mapas temáticos

Para elaboração dos mapas temáticos, o software Biostat foi utilizado para determinação estatística da composição isotópica de cada ano do recorte temporal, resultando em eventos de chuvas “Empobrecidas”, “Médias” e “Enriquecidas”. Estes eventos foram tabulados e as trajetórias respectivas foram especializadas através do software ArcGis 10.6.1, com a separação dos 3 frames de composição isotópica para cada ano.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

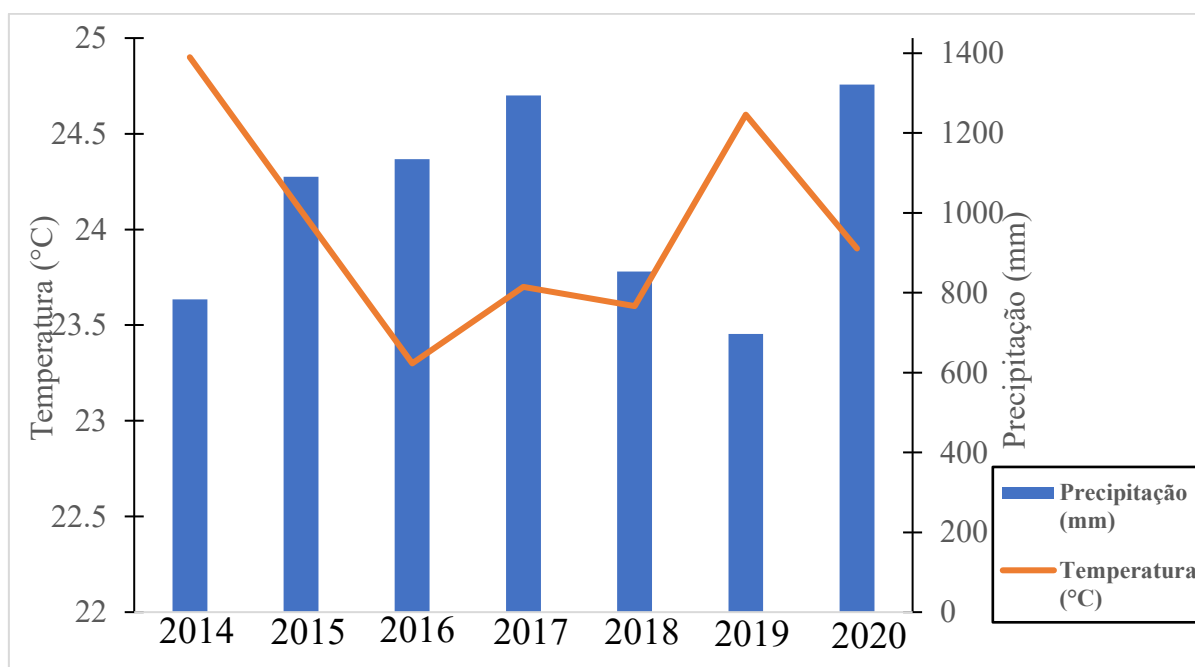
4.1 Variações dos parâmetros climáticos

Todos os anos analisados (Gráfico 1) registraram valores de precipitação menores do que a normal climatológica (1437.9mm) para precipitação. A temperatura variou de 23.3°C em 2016 a 24,9°C em 2014, com a média dos dados analisados acima da média histórica (23,1°C). A umidade relativa variou de 66% em 2020 a 76% em 2015.

Observou-se no período 2014-2020 uma variação dos volumes de precipitação em relação às médias históricas (figura 1). Durante o ano de 2014, os volumes registrados foram 45,5% abaixo da média mensal, principalmente durante o período chuvoso. Os anos 2017 e 2020 volumes similares de precipitação, apesar de permanecerem abaixo da média histórica. O ano de 2020 apresentou o maior volume de chuva na escala temporal da análise, com uma diferença de 8% da normal climatológica e temperatura de 23,9 graus °C.

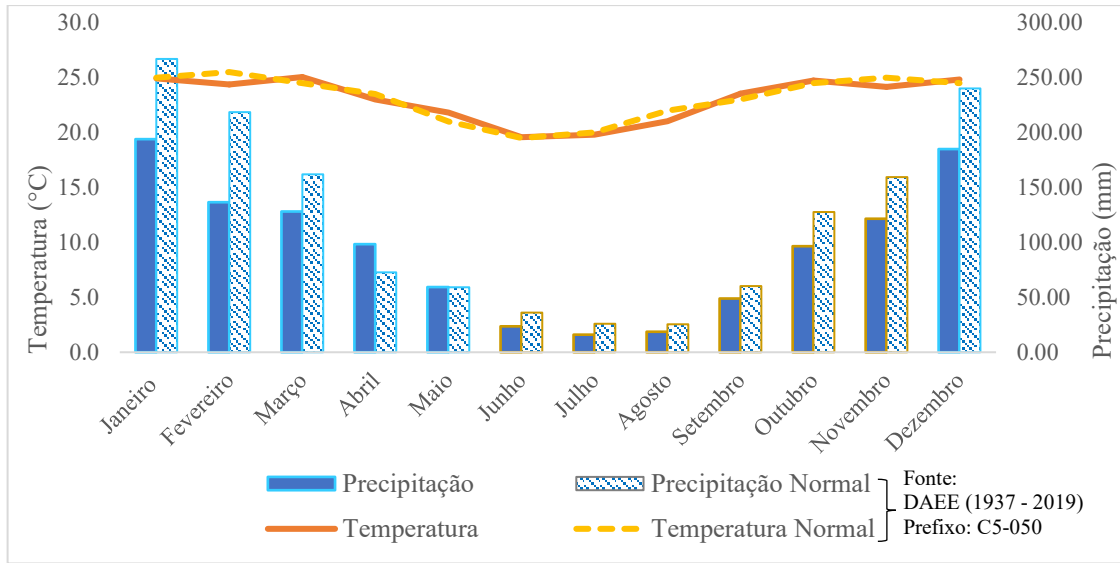
A estação chuvosa apresentou valores superiores de precipitação e temperatura em relação à estação seca (Gráfico 2) com valores inferiores à média histórica para precipitação e similares para temperatura. A precipitação, temperatura e umidade, variaram, respectivamente de 16mm (Julho) a 193,8mm (Janeiro), de 19,6°C (Junho) a 25,1°C (Março) e de 55% (Setembro) a 77,7% (Janeiro).

Gráfico 1. Variação anual de temperatura e precipitação.



Elaboração da autora.

Gráfico 2. Variação mensal de temperatura e precipitação.



Elaboração da autora.

4.2 Análise da composição isotópica da precipitação

Os valores estatísticos das variáveis ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ e d-excess) são apresentados na Tabela 1, com notação delta (δ) igual à 0 na escala VSMOW e multiplicados por mil (‰), como convenção. Ao longo do intervalo temporal (2014-2020), os valores de ^2H e ^{18}O variaram, respectivamente, de -132.10 à +47.90 e -18.02 à +5.22, assim como, os valores de d-excess também demonstraram uma variação significativa, de 4.24 à 26.16.

Tabela 1. Análise estatística do intervalo temporal.

Variáveis	Mín.	Máx	1º Quartil (25%)	3º Quartil (75%)	Média ponderada	Média/Desvio Padrão
$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	-18.02	5.22	-6.95	-2.09	-6.00	-4.60±3.78
$\delta^2\text{H}(\text{‰})$	-132.1	47.9	-39.7	-1.9	-33.0	22.7±30.1
d-excess(‰)	4.2	26.1	11.8	17	14.5	14.4±4

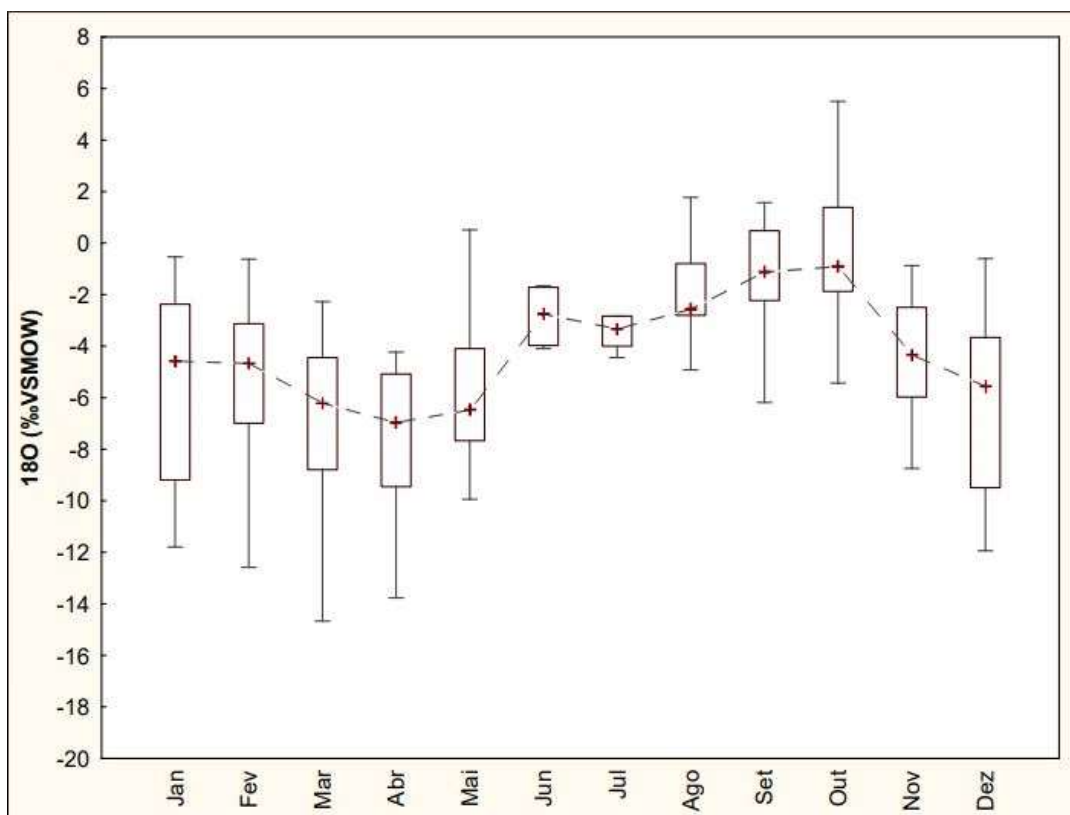
Elaboração da autora.

Não há correlação entre o conteúdo isotópico da precipitação com a temperatura ($r=0.10$, $p\text{-valor}=0.15$) e a precipitação ($r= -0.42$, $p\text{-valor} = <0.0001$). O valor negativo do coeficiente r da precipitação indica um efeito inversamente proporcional entre as variáveis, ou seja, quanto maior a quantidade de precipitação, espera-se resultados mais negativos (empobrecidos) do conteúdo isotópico, assim como, quanto menor a quantidade de precipitação, o conteúdo isotópico tende a ser mais positivo (enriquecido). Em relação à

temperatura, a baixa correlação pode indicar as pequenas variabilidades sazonais do elemento climático em regiões tropicais (AGGARWALL *et al.*, 2016; SÁNCHEZ-MURILLO *et al.*, 2016). Cabe destacar que a falta de correlação entre as variáveis pode estar relacionada à frequência semanal das amostras, sendo que outros intervalos temporais podem ser explorados.

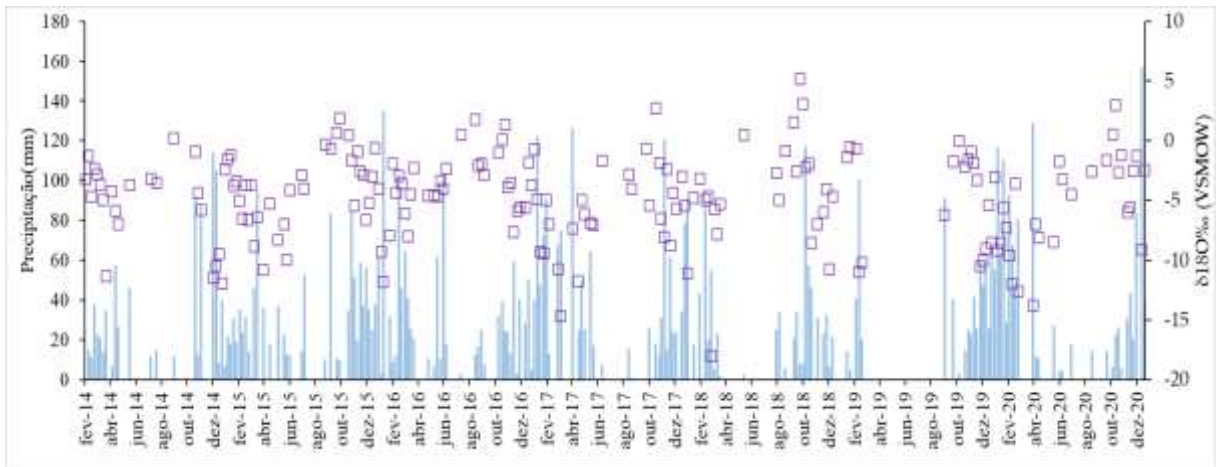
Observa-se uma variação sazonal da composição isotópica da precipitação, visto que as chuvas mais empobrecidas (maior conteúdo de isótopos leves) ocorrem durante a estação chuvosa, entre os meses de Novembro a Abril, assim como, as chuvas mais enriquecidas (maior conteúdo de isótopos pesados) ocorrem durante a estação seca, de Maio a Outubro (Gráfico 3). O Gráfico 4 permite considerar que os meses com a composição isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ mais negativos são Fevereiro e Abril, com destaque para valores de $\delta^{18}\text{O}$ de -18.02‰ (Fev/18) e -14.67‰ (Abr/2017), assim como, Setembro e Outubro apresentam conteúdo isotópico mais enriquecido, com valores mais positivos em Set/2018 (5.22‰) e Out/2018 (3.09‰). A variabilidade da composição isotópica entre os meses chuvosos e secos pode estar relacionada a um possível efeito de sazonalidade (GASTMANS *et al.*, 2017; ROZANSKI; ARAGUÁS, 1995).

Gráfico 3. Composição isotópica sazonal.



Elaboração da autora.

Gráfico 4. Composição isotópica mensal.

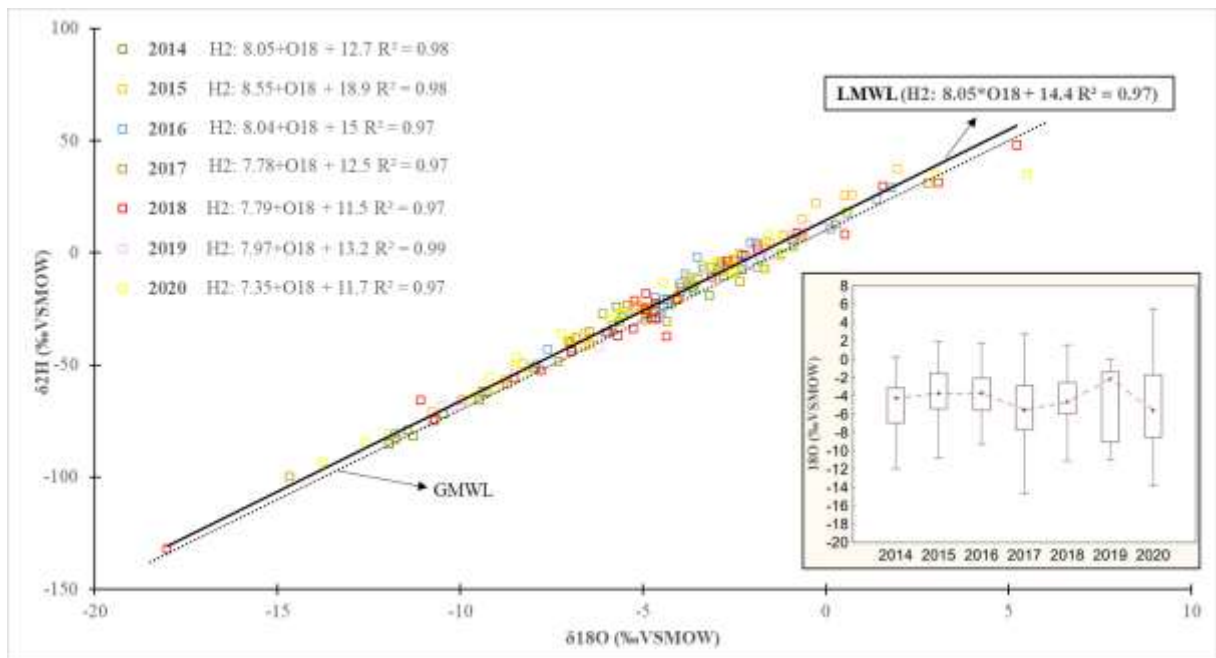


Elaboração da autora.

A Linha Meteórica Local (LMWL) apresenta a equação $\delta^2\text{H} = 8.05 * \delta^{18}\text{O} + 14.4$, com inclinação semelhante a Reta Meteórica global (GMWL) e intercepto maior que 10‰ ($\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$) (Gráfico 5). Os valores de d-excess maiores que 10 indicam que as massas de ar que alcançaram a região sofreram processos de evaporação no seu trajeto (CRAIG, 1964).

Observa-se uma grande variabilidade interanual na composição isotópica ao longo do intervalo temporal analisado. Os anos de 2014 e 2017 apresentaram, respectivamente, médias aritméticas de $\delta^{18}\text{O}$ mais negativas -5.24‰ e -5.62‰, enquanto os anos de 2015 e 2016 apresentaram o mesmo valor, de -3.86‰, portanto, os anos com a composição isotópica da precipitação mais positiva. Os anos de 2018 a 2020 apresentaram valores em torno de -4‰. Essas diferenças interanuais foram ressaltadas no teste de Kruskal-Wallis, que identificou diferenças estatísticas significativas ($p\text{-valor} < 0.05$) para os valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre os anos de 2015 e 2016 em relação à 2017. Tais valores refletem similaridades anuais de variações climáticas derivadas de diferenças de umidade disponível e processos de recirculação de vapor intensos (YANG, 2019).

Gráfico 5. Variabilidade anual da composição isotópica.



Elaboração da autora.

4.3 Trajetórias do HYSPLIT

Para a seleção das trajetórias, os eventos foram separados em função da sua distribuição estatística interanual, sendo considerados eventos empobrecidos, médios e enriquecidos. Os valores são apresentados $\delta=0$ na escala VSMOW e multiplicados por mil (‰) (Tabela 2).

Tabela 2. Análise estatística das trajetórias HYSPLIT.

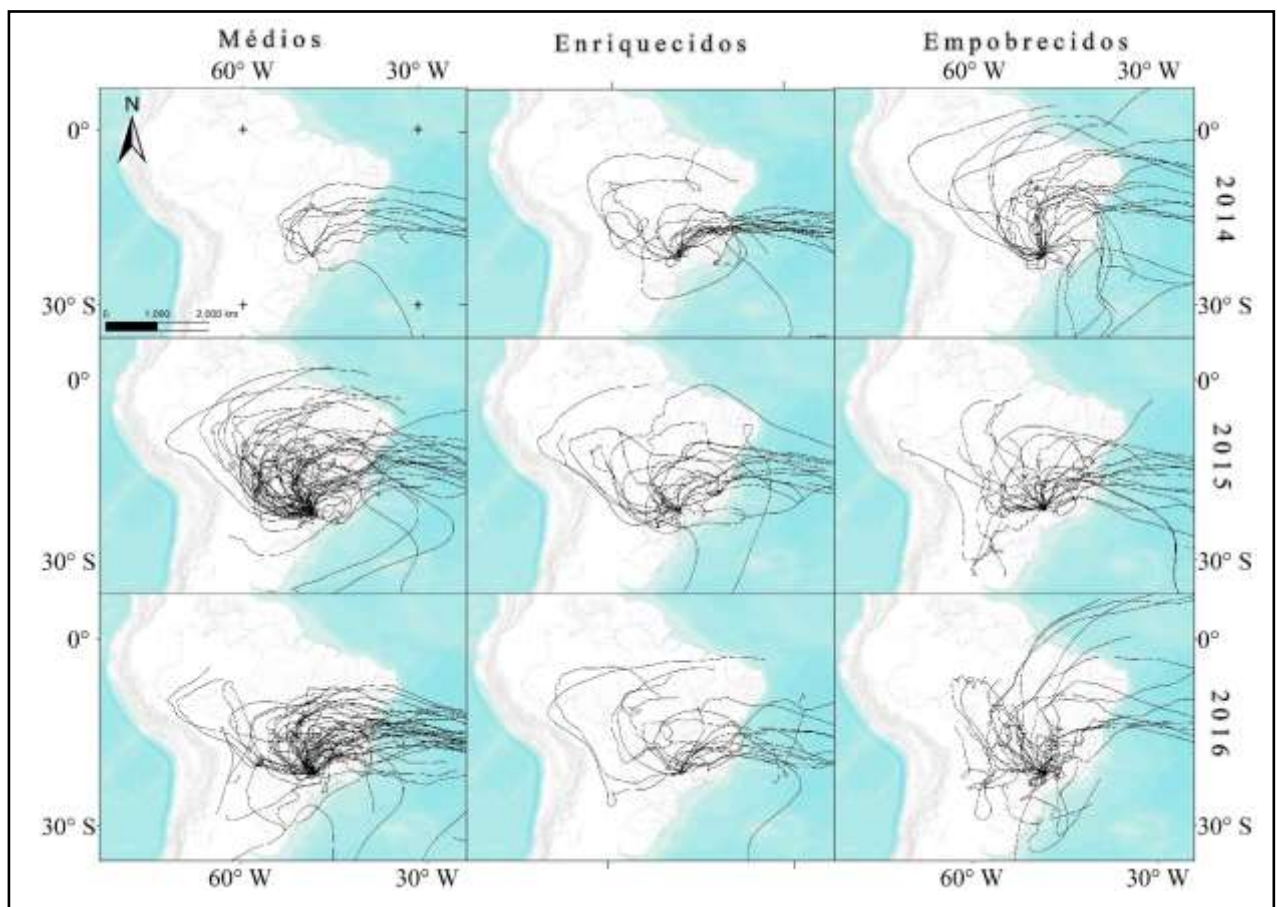
Ano	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Tamanho da amostra	22	34	34	29	26	18	29
1º Quartil (25%)	-6.67	-6.14	-5.33	-7.31	-5.90	-8.90	-8.47
3º Quartil (75%)	-3.15	-1.55	-2.11	-2.99	-2.30	-1.42	-2.45
Média Aritmética	-5.24	-3.86	-3.86	-5.62	-4.43	-4.70	-4.95

Elaboração da autora.

Totalizando 192 trajetórias, nota-se que o maior número de amostras se refere aos anos de 2015 e 2016, sendo que estes possuem a maior média aritmética de $\delta^{18}O$ (-3.86‰). Em relação ao menor número de amostras, o ano de 2019 possui 18 trajetórias, seguido de 2014,

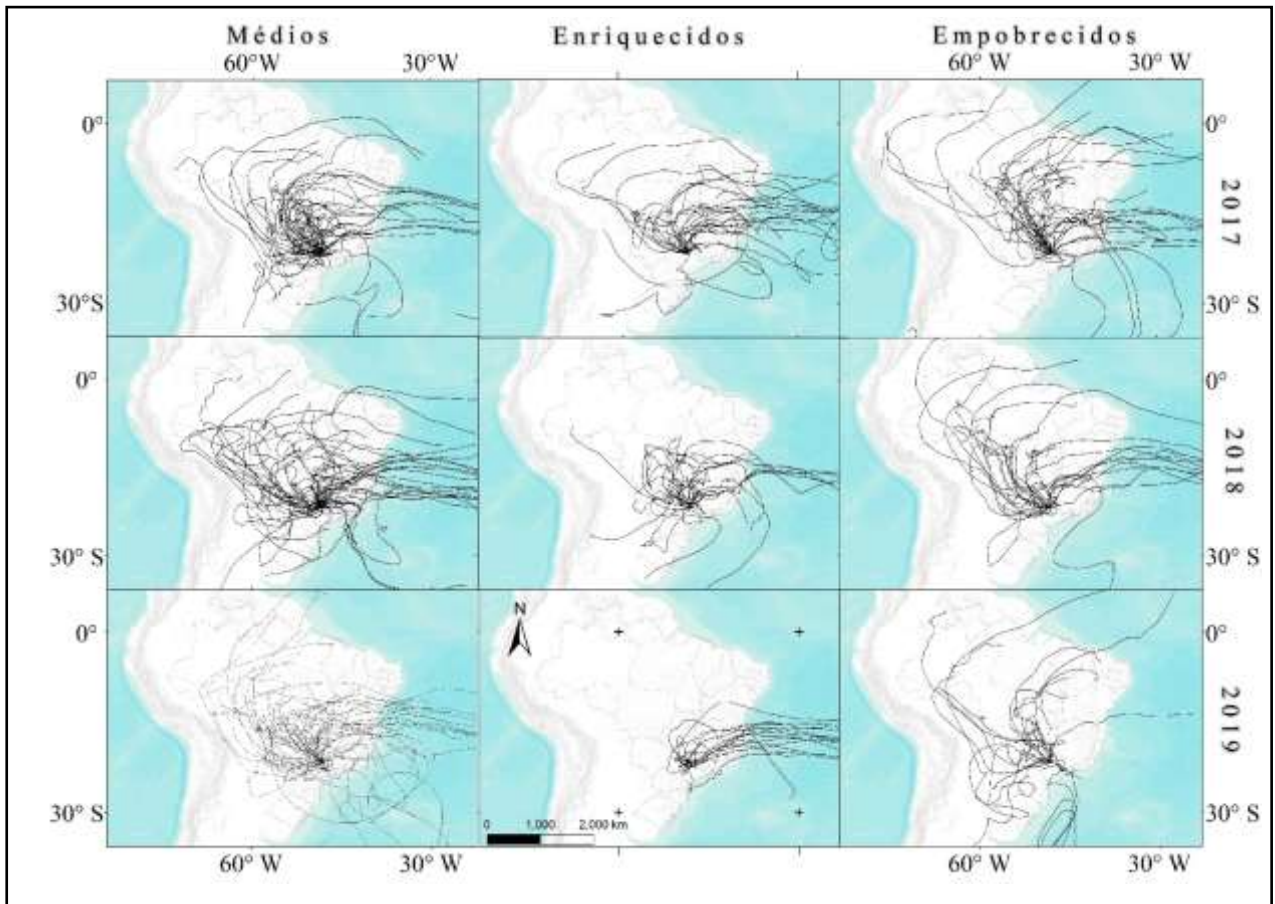
com 22 amostras. O ano de 2019 possui o maior intervalo estatístico comparado aos demais anos, com o primeiro quartil de -8.90% e terceiro quartil 1.42%. Neste ano ocorreu um “gap” de dados que se estendeu de Fevereiro a Setembro, sendo necessário considerar que os dados da estação seca não foram demonstrados integralmente. A partir da análise estatística, as trajetórias HYSPLIT foram especializadas em mapas temáticos, conforme ilustrado nas Figuras 1, 2 e 3.

Figura 5. Trajetórias HYSPLIT 2014-2016.



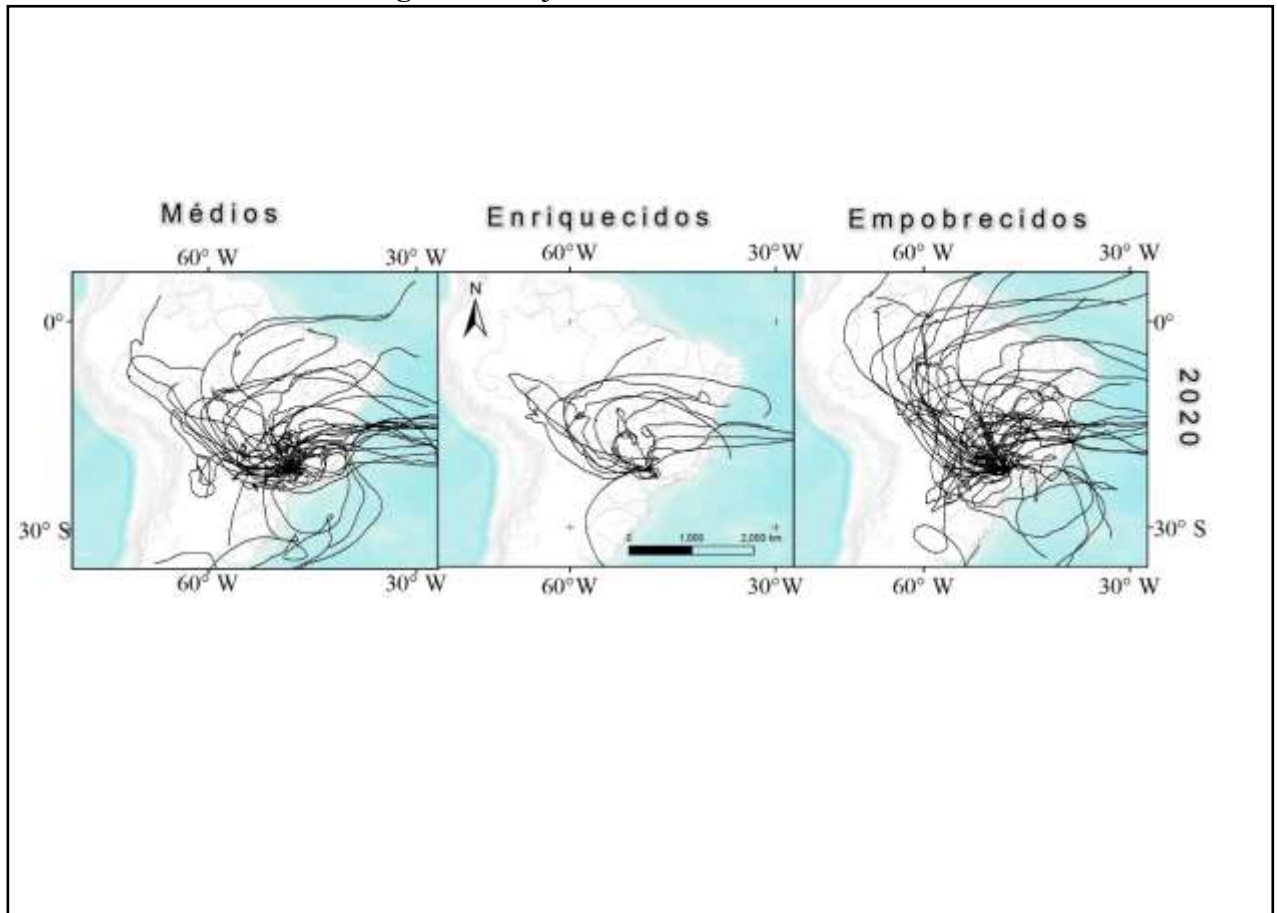
Elaboração da autora.

Figura 6. Trajetórias HYSPLIT 2017-2019.



Elaboração da autora.

Figura 7. Trajetórias HYSPLIT 2020.



Elaboração da autora.

Analisando as figuras, é possível verificar uma clara influência da região amazônica no deslocamento da precipitação. Sendo assim, a análise combinada dos valores de d-excess das LMWL interanuais e geral (com valores <10) e os mapas temáticos sugere que a precipitação que alcança a região central do estado de São Paulo possui uma clara influência de processos de recirculação de vapor derivados da floresta amazônica.

Além disso, os mapas temáticos demonstram um padrão de comportamento sazonal em relação à composição isotópica de $\delta^{18}\text{O}$. Observa-se que as trajetórias Enriquecidas, que ocorrem significativamente durante a estação seca, possuem a tendência de receber umidade do Atlântico Sul e adentrar o continente pela região centro-sul. Para as trajetórias Empobrecidas, que ocorrem com maior frequência durante a estação chuvosa, nota-se que a fonte do vapor está relacionada à região Equatorial e seu deslocamento perpassa a região Amazônica para precipitar na área de estudo.

A trajetória da precipitação sazonal nos mapas temáticos pode ser associada a atuação de sistemas meteorológicos que afetam a região Sudeste. Sendo que, durante a estação chuvosa, o deslocamento mais ao Sul da ZCIT e o escoamento da umidade derivada do Oceano Atlântico

e reincorporada pela floresta Amazônica, acarretam no padrão de deslocamento da precipitação e no empobrecimento isotópico. Já durante a estação seca, a aproximação da ASAS e o deslocamento da ZCIT mais ao Norte, acarretam uma menor disponibilidade de umidade no Sudeste e no padrão de escoamento do vapor.

A partir da observação dos mapas temáticos e segundo INPE (2021), os anos de 2015-2016 demonstram a fase positiva do El Niño, com ocorrência de caráter forte. A anomalia é evidenciada com o aumento de trajetórias (enriquecidas e empobrecidas) que recebem vapor da Amazonia, pois há uma intensificação dos JBN. A composição isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ mais enriquecida (principalmente durante a estação seca) também evidenciou o fenômeno, que pode estar relacionada a alteração de umidade disponível na região amazônica (JOUZEL, 2013; SANTOS, 2019b, MACHADO, 2020).

O ano de 2014 demonstrou, em função da menor quantidade de chuvas, o menor número de trajetórias comparado aos demais anos. Pode-se relacionar a diminuição das amostras ao estabelecimento de um sistema de alta pressão anômalo que se formou sobre o Oceano Atlântico, próximo à região sudeste, reduzindo a formação de chuva e bloqueando a penetração de sistemas frontais provenientes do sul do país (COELHO, 2016; BRAGA & MOLION, 2019).

Os anos de 2017-2018 não demonstraram alterações significativas das trajetórias da umidade em relação aos demais anos, apesar de terem sido anos de fase positiva do fenômeno La Niña (INPE, 2021). Contudo, nota-se que os valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre os anos são significativamente diferentes dos anos em que ocorreu o fenômeno El Niño (2015-2016), sendo que 2017-2018 apresentaram, respectivamente, valores mais empobrecidos de $\delta^{18}\text{O}$ (5,6‰ e 4,4‰). Destaca-se que, segundo o INPE (2021), a La Niña (2017-2018) apresentou caráter moderado, portanto, sugere-se que por demonstrar impactos mais amenos, as trajetórias não demonstraram grandes alterações de deslocamento, assim como, não se observou diferenças da composição isotópica durante a estação seca ou chuvosa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Verificou-se que, embora os parâmetros climáticos de precipitação e temperatura não se correlacionarem significativamente com a composição isotópica da chuva, os testes estatísticos demonstraram uma relação inversamente proporcional da quantidade de precipitação e da composição isotópica. Sendo assim, este estudo sugere que outras frequências temporais do conteúdo isotópico da precipitação sejam consideradas na correlação com parâmetros climáticos, visto que foi possível verificar uma relação entre as variáveis.

A atuação dos sistemas meteorológicos geradores de precipitação na região de estudo confere uma dinâmica sazonal dos parâmetros climáticos de temperatura e quantidade de precipitação, à qual é impressa na composição isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ da precipitação. Todavia, faz-se necessário mais estudos acerca do comportamento do d-excess em escala sazonal, posto que não foi possível estabelecer uma relação entre a variável e a dinâmica atmosférica nos meses que compreendem a estação chuvosa e a estação seca.

A análise combinada das trajetórias HYSPLIT e a composição isotópica da precipitação indicaram que as trajetórias aliadas ao uso de ferramentas de composição isotópica permitiram compreender as diferentes fontes e trajetórias em escala interanual, com destaque para a relação da precipitação na área de estudo e a região amazônica e fenômenos ENSO. Sendo assim, foi possível demonstrar que modificações na dinâmica de escoamento do vapor que atinge o Sudeste também reflete na composição isotópica interanual e sazonal, como ocorreu nos anos de 2015 e 2016.

Salienta-se que foi possível observar que, ao longo do intervalo temporal, pequenos períodos, de 2 a 3 semanas seguidas, demonstraram uma sequência de conteúdo isotópico mais negativo, principalmente nos meses de fevereiro. Cabe, portanto, futuras investigações em relação à este padrão, visto que o mês de ocorrência se relaciona à ocorrência da ZCAS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGGARWAL, P. K., ROMATSCHKE, U., ARAGUAS-ARAGUAS, L., BELACHEW, D., LONGSTAFFE, F. J., BERG, P., SCHUMACHER, C., & FUNK, A. (2016). Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. **Nature Geoscience**, **9(8)**, 624–629. <https://doi.org/10.1038/ngeo2739>
- BASTOS, CAMILLA C.; FERREIRA, NELSON J. Análise climatológica da alta subtropical do Atlântico Sul. **CEP**, v. 12220, n. 110, p. 973-990, 2000.
- BRAGA, Hugo Alves; MOLION, Luiz Carlos Baldicero. A Seca de 2013/2014 na Região Sudeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 100-107, 2019.
- CAVALCANTI, I. F. (2016). **Tempo e clima no Brasil**. Oficina de textos.
- CLARK, I., & FRITZ, P. (1997). **Environmental Isotopes in Hydrogeology (First)**. CRC Press.
- COELHO, Caio AS; CARDOSO, Denis HF; FIRPO, Mári AF. A seca de 2013 a 2015 na região sudeste do Brasil. **Climanálise—Edição Especial de**, v. 30, p. 55-61, 2016.
- DANSGAARD, Willi. Stable isotopes in precipitation. **tellus**, v. 16, n. 4, p. 436-468, 1964.
- FLANTUA, S. G. A. et al. Climate variability and human impact in South America during the last 2000 years: synthesis and perspectives from pollen records. **Climate of the Past**, v. 12, n. 2, p. 483–523, 2016
- GALEWSKY, J., STEEN-LARSEN, H. C., FIELD, R. D., WORDEN, J., RISI, C., & SCHNEIDER, M. (2016). Stable isotopes in atmospheric water vapor and applications to the hydrologic cycle. **Reviews of Geophysics**, **54(4)**, 809–865. <https://doi.org/10.1002/2015RG000512>.
- 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. **Isot. Environ. Health Stud.** 2017, **53**, 518–538. <https://doi.org/10.1080/10256016.2017.1305376>
- GIMENO, Luis et al. The residence time of water vapour in the atmosphere. **Nature Reviews Earth & Environment**, p. 1-12, 2021.
- IAEA/WMO (current Year). Global Network of Isotopes in Precipitation. **The GNIP Database**. Accessible at: <http://www.iaea.org/water>.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. CONDIÇÕES ATUAIS DO ENOS: LA NIÑA. **INPE**, 2021. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>.
- ISHIZAKI, Y., YOSHIMURA, K., KANAE, S., KIMOTO, M., KURITA, N., & OKI, T. (2012). Interannual variability of H² and ¹⁸O in precipitation over the Asian monsoon region. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, **117(D16)**, D16308. <https://doi.org/10.1029/2011JD015890>
- International Atomic Energy Agency: RCWIP (Regionalized Cluster-Based Water Isotope Prediction) Model – gridded precipitation $\delta^{18}\text{O}|\delta^2\text{H}| \delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ isoscape data.

International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, <year>, available at <http://www.iaea.org/water> (downloaded at YYYY-MM-DD).

JASECHKO, S., BIRKS, S. J., GLEESON, T., WADA, Y., FAWCETT, P. J., SHARP, Z. D., MCDONNELL, J. J., & WELKER, J. M. (2014). The pronounced seasonality of global groundwater recharge. **Water Resources Research**, **50**, 8845–8867. <https://doi.org/10.1002/2014WR015809>.

Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. **Journal of the American statistical Association**, **47(260)**, 583-621.

JOUZEL, J., DELAYGUE, G., LANDAIS, A., MASSON-DELMOTTE, V., RISI, C., & VIMEUX, F. (2013). Water isotopes as tools to document oceanic sources of precipitation. **Water Resources Research**, **49(11)**, 7469–7486. <https://doi.org/10.1002/2013WR013508>

LIMA, Kellen Carla; SATYAMURTY, Prakki; FERNÁNDEZ, Júlio Pablo Reyes. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in Southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. **101**, n. **1**, p. **121-135**, 2010.

MACHADO, Jeferson Prietsch et al. Condições atmosféricas associadas a eventos de ressaca no litoral sul e do sudeste do Brasil durante o El Niño 2015/2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. **34**, p. **529-544**, 2020.

Mendonça, F., & Danni-Oliveira, I. M. (2017). **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. Oficina de textos.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989

NUNES, L. H.; KOGA-VICENTE, A.; CANDIDO, D. H. Clima da região Sudeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. de A. et al (Orgs). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2009.

MARENGO, Jose A.; OLIVEIRA, GS de. Impactos do fenômeno La Niña no tempo e clima do Brasil: desenvolvimento e intensificação do La Niña 1998/1999. In: **Congresso Brasileiro De Meteorologia**. 1998.

PALLOTTA, M.; NAKAZATO, R. Y. Caracterização de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Zona de Convergência de umidade (ZCOU) em janeiro e fevereiro de 2010. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 16, 2010, Belém, **Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2010.

PEEL, M.C., FINLAYSON, B.L., MCMAHON, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrol. Earth Syst. Sci.** **11**, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

PEREIRA, Heloisa Ramos; REBOITA, Michelle Simões; AMBRIZZI, Tércio. Características da atmosfera na primavera austral durante o El Niño de 2015/2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. **32**, p. **293-310**, 2017.

PFAHL, S., & SODEMANN, H. (2014). 012-What controls deuterium excess in global precipitation? **Climate of the Past**, **10(2)**, 771–781. <https://doi.org/10.5194/cp-10-771-2014>

- RAO, J., & REN, R. (2017). Parallel comparison of the 1982/83, 1997/98 and 2015/16 super El Niños and their effects on the extratropical stratosphere. **Advances in Atmospheric Sciences**, **34(9)**, 1121–1133. <https://doi.org/10.1007/s00376-017-6260-x>
- Reboita MS, Gan MA, Rocha RP, Ambrizzi T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia** 2010; **25(2)**: 185-204. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>
- RISI, C., NOONE, D., FRANKENBERG, C., & WORDEN, J. (2013). Role of continental recycling in intraseasonal variations of continental moisture as deduced from model simulations and water vapor isotopic measurements. **Water Resources Research**, **49(7)**, 4136–4156. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20312>
- ROZANSKI, K., ARAGUÁS-ARAGUÁS, L., & GONFIANTINI, R. (1993). **Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation**. 1–36. <https://doi.org/10.1029/GM078p0001>
- S. Terzer, L. I. Wassenaar, L. J. Araguás-Araguás, and P. K. Aggarwal: Global isoscapes for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in precipitation: improved prediction using regionalized climatic regression models. **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, **10**, 7351–7393, 2013. doi:10.5194/hessd-10-7351-2013
- SÁNCHEZ-MURILLO, R., BIRKEL, C., WELSH, K., ESQUIVEL-HERNÁNDEZ, G., CORRALES-SALAZAR, J., BOLL, J., BROOKS, E., ROUPSARD, O., SÁENZ-ROSALES, O., KATCHAN, I., ARCE-MESÉN, R., SOULSBY, C., & ARAGUÁS-ARAGUÁS, L. J. (2016). Key drivers controlling stable isotope variations in daily precipitation of Costa Rica: Caribbean Sea versus Eastern Pacific Ocean moisture sources. **Quaternary Science Reviews**, **131**, 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.08.028>
- SANTOS, V. Variações na composição isotópica da precipitação na porção central do estado de São Paulo e sua relação com sistemas climáticos. 2018. 95 f. **Tese (Doutorado)** - Curso de Geografia, Geociências e Meio Ambiente, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Campus de Rio Claro, Rio Claro, 2018.
- SANTOS, V., GASTMANS, D., SÁNCHEZ-MURILLO, R., FELIPPE GOZZO, L., VIANNA BATISTA, L., LILLA MANZIONE, R., & MARTINEZ, J. (2019a). Regional atmospheric dynamics govern interannual and seasonal stable isotope composition in southeastern Brazil. **Journal of Hydrology**, **579**, 124136. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124136>
- SANTOS, V., DIAS DE OLIVEIRA, M., BOLL, J., SÁNCHEZ-MURILLO, R., MENEGÁRIO, A. A., GOZZO, L. F., & GASTMANS, D. (2019b). Isotopic composition of precipitation during strong El Niño–Southern Oscillation events in the Southeast Region of Brazil. **Hydrological Processes**, **33(4)**, 647–660. <https://doi.org/10.1002/hyp.13351>
- SANTOS, V. O papel da Amazônia no regime de chuvas no Sudeste. **UnespCiência, Rio Claro**, v. 104, n. 10, p. 3-34, 1 fev. (2019c). Disponível em: <http://unespciencia.com.br/2019/02/01/edicao-104/>. Acesso em: 28 jan. 2021.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, **52(3/4)**, 591-611.
- SRIVASTAVA, R., RAMESH, R., & RAO, T. N. (2012). Relationship between stable isotope ratios and drop size distribution in tropical rainfall. **Journal of Atmospheric Chemistry**, **69(1)**, 23–31. <https://doi.org/10.1007/s10874-012-9227-4>

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**, 20.

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.

VUILLE, M. (2003). Modeling $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation over the tropical Americas: 1. Interannual variability and climatic controls. **Journal of Geophysical Research**, **108(D6)**, 4174. <https://doi.org/10.1029/2001JD002038>

WINNICK, M. J., CHAMBERLAIN, C. P., CAVES, J. K., & WELKER, J. M. (2014). Quantifying the isotopic “continental effect.” **Earth and Planetary Science Letters**, **406**, 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.09.005>

Yang, Q., Mu, H., Guo, J., Bao, X., & Martín, J. D. (2019). Temperature and rainfall amount effects on hydrogen and oxygen stable isotope in precipitation. **Quaternary international**, **519**, 25-31.