

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 15/06/2024.

**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOCIÊNCIAS
E MEIO AMBIENTE**

**ISÓTOPOS ESTÁVEIS DA ÁGUA ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$) EM INTRA-EVENTOS:
DECIFRANDO A HISTÓRIA DA CHUVA NA PORÇÃO
CENTRAL DO ESTADO DE SÃO PAULO**

VINICIUS DOS SANTOS

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

RIO CLARO - SP - 2023

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

VINICIUS DOS SANTOS

ISÓTOPOS ESTÁVEIS DA ÁGUA ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$) EM INTRA- EVENTOS: DECIFRANDO A HISTÓRIA DA CHUVA NA PORÇÃO CENTRAL DO ESTADO DE SÃO PAULO

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

Orientador: Didier Gastmans
Coorientadora: Ana María Durán-Quesada

Rio Claro - SP
2023

S237i Santos, Vinicius dos
Isótopos estáveis da água (^{18}O - ^2H) em intra-eventos :
decifrando a história da chuva na porção central do estado de
São Paulo / Vinicius dos Santos. -- Rio Claro, 2023
123 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Didier Gastmans
Coorientadora: Ana María Durán-Quesada

1. Chuva. 2. Isótopos estáveis. 3. Água. 4. Radar nas
geociências. 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.

VINICIUS DOS SANTOS

ISÓTOPOS ESTÁVEIS DA ÁGUA ($\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$) EM INTRA- EVENTOS: DECIFRANDO A HISTÓRIA DA CHUVA NA PORÇÃO CENTRAL DO ESTADO DE SÃO PAULO

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

Comissão Examinadora

Prof. Dr. DIDIER GASTMANS
CEA / UNESP / RIO CLARO (SP)

Profa. Dra. ANA MARÍA DURÁN-QUESADA
Universidad de Costa Rica / San José (Costa Rica)

Prof. Dr. RICARDO ALONSO SÁNCHEZ-MURILLO
University of Texas/ Arlington (EUA)

Prof. Dr. GILBERTO FERNANDO FISCH
UNITAU / São José dos Campos (SP)

Prof. Dr. RODRIGO LILLA MANZIONE
FCTE / UNESP / Ourinhos (SP)

Prof. Dr. LUIZ FELIPPE GOZZO
FC / UNESP / Bauru (SP)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro/SP, 15 de dezembro de 2022.

Á família e amigos.

Á minha companheira Fran.

Á todas(os) que me ajudaram nesta vida.

Á todas(os) que lutaram pelo ensino público gratuito.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa de doutorado (Processo nº 2019/03467-3) e Bolsa de Estágio de Pesquisa no Exterior (BEPE) (Processo nº 2021/10538-4), e aos recursos do projeto coordenado pelo Didier Gastmans (Processo nº 2018/06666-4). Todos estes recursos foram imprescindíveis para realização deste trabalho. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Didier, pela parceria desde os tempos de iniciação científica até o doutorado. Não só pela contribuição científica e de formação, mas por todas as conversas, risadas e troca de conhecimento envolvendo vida, música, futebol e variados assuntos. Agradeço a professora Ana María da Universidade da Costa Rica, pelo grande aprendizado durante o período de sanduiche, sem os quais as principais interpretações deste trabalho não teriam acontecido.

Agradeço meu Pai e Soso, por todo aporte financeiro, carinho, exemplo e confiança, sem os quais não teria tido a oportunidade de me manter na universidade e conhecer o mundo acadêmico para me tornar um doutor. A Mainha, que mesmo estando longe, diariamente envia bençãos e orações para me ajudar e proteger, minhas irmãs e sobrinha queridas, por sempre torcerem por mim.

Agradeço ao meu amor, companheira, confidente e amante, Fran, por toda dedicação, paciência, carinho e ajuda nos momentos de ansiedade e angústia que o doutorado promove. Por não desistir da gente, mesmo quando eu estava trabalhando na pesquisa em outro país.

Agradeço ao Marquinhos pela instalação do Radar e ajuda na construção da casinha de coleta da chuva, e aos amigos fundadores da diretoria do LARHIA por terem participado desta etapa da minha vida, pela ajuda, troca de conhecimentos, zoeiras e cafés ao longo do dia a dia de trabalho desta pesquisa. Também aos demais membros do grupo. Aos amigos da antiga Rep. Então pela convivência na república, e aos amigos da UNESP pelo apoio de sempre.

Agradecimentos a todas(os) as funcionárias(os) da UNESP, em especial ao Demilson do IPmet, Rosana e seção de pós-graduação do IGCE, Lu, Miriam e demais funcionários do CEA.

*“não existem fatos eternos: assim como
não existem verdades absolutas”.*
(NIETZSCHE, 2017, p.17).

RESUMO

Isótopos estáveis da molécula de água, hidrogênio ($^1\text{H}/^2\text{H}$) e oxigênio ($^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$), constituem excelentes traçadores da movimentação da água no ciclo hidrológico. Devido a necessidade de entender como o ciclo da água tem respondido às mudanças climáticas, este estudo buscou compreender a formação e evolução isotópica dos tipos de chuva, principalmente convectivas e estratiformes, que tem sido tema de interesse na comunidade de isotopia. Foram analisadas 312 amostras de isótopos em 18 intra-eventos (coletados a cada 5-10-30 minutos) entre setembro/2019 e fevereiro/2021. Com um Micro Radar de Chuva, imagens do satélite GOES-16 e uma estação meteorológica compacta, estes eventos foram classificados em chuvas convectivas, estratiformes, mistas e não-classificadas. Estes tipos de chuva foram formados pela interação entre umidade (proveniente do Oceano Atlântico, com 3 caminhos distintos até chegar no estado de São Paulo, o próprio Oceano Atlântico, Sul do Brasil e floresta Amazônica) e sistemas atmosféricos variados (Frentes frias, Zona de convergência do Atlântico Sul e Instabilidades termais). Os 3 caminhos da umidade geraram um vapor que caracteriza a história pretérita das chuvas (influência regional), perdendo isótopos pesados ao longo do caminho. Por diferentes mecanismos, este esgotamento foi ampliado ou modificado localmente durante a formação das chuvas. Assim, chuvas convectivas revelaram as diferenças diurnas da atividade convectiva, produzindo valores de $\delta^{18}\text{O}$ mais negativos (menos negativos) durante o dia (noite), enquanto as chuvas estratiformes refletiram o ciclo de vida, de fases de desenvolvimento (com $\delta^{18}\text{O}$ enriquecidos), fase madura ($\delta^{18}\text{O}$ moderados) e de dissipação ($\delta^{18}\text{O}$ mais negativos). Em chuvas convectivas e estratiformes, estes valores mais empobrecidos de $\delta^{18}\text{O}$ (-8 ~ -16‰) representam esgotamento máximo de isótopos pesados (destilação Rayleigh), amplificando os processos regionais, que foram modificados por processos evaporativos locais, durante a queda das gotas de chuva, produzindo $\delta^{18}\text{O}$ enriquecido (>-7 ~ 3‰) e menores valores de d -excess (<10‰). Tal interpretação foi confirmada com bons ($r > 0,50$) e significativos ($p < 0,05$) modelos de regressão lineares. Os resultados apresentados geraram dados observacionais finos que podem ser utilizados em modelos climáticos e preenchem uma lacuna na discussão dos controles climáticos sobre a composição isotópica no interior continental de áreas tropicais.

Palavras-chave: Isótopos estáveis da água, tipos de chuva, micro radar de chuva.

ABSTRACT

Stable isotopes of water, hydrogen ($^1\text{H}/^2\text{H}$) and oxygen ($^{16}\text{O}/^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$) are powerful tracers of water movement in the hydrological cycle. Due to the necessity to understand how the hydrological cycle has the answer to climate change, this study's purpose is to understand the isotopic rainfall formation and evolution in rainfall types, mainly convective and stratiform, that has been a topic of interest in isotopes community. The 312 isotope samples in 18 intra-events (collected in 5-10-30 minutes intervals) were analyzed between September/2019 to February/2021. The Micro Rain Radar, GOES-16 satellite imagery and compact weather station were used to classify the rainfall types into convective, stratiform, mixed and no-classified. These rainfall types were formed by the interaction between humidity (from the Atlantic Ocean, with 3 pathways arriving in the São Paulo state, the Atlantic Ocean, South of Brazil and the Amazon Forest) and varied atmospheric systems (e.g., Cold fronts, South America Convergence Zone, thermal instability). The 3 humidity pathways generated a vapor that characterized the past rainfall (regional influence) before the local formation, with depletion in heavy isotopes during these pathways. Due to distinct mechanisms, this depletion was amplified and modified during local rainfall formation. Thus, convective rainfall reveals the diurnal difference in convective activity, generating more negative (less negative) $\delta^{18}\text{O}$ values during day (night), while stratiform rainfall reflected the life cycle, of developing phases (with enriched $\delta^{18}\text{O}$ values), the mature phase ($\delta^{18}\text{O}$ moderate), and the dissipating phase (negative $\delta^{18}\text{O}$ values). In the convective and stratiform rainfall, the negative $\delta^{18}\text{O}$ values ($-8 \sim -16\text{‰}$) represented the heavy depletion in isotopes, amplified the regional processes, that they were modified by local evaporative processes, during the falling raindrops, resulting in enriched $\delta^{18}\text{O}$ values ($>-7 \sim 3\text{‰}$) and lower d -excess ($<10\text{‰}$). This interpretation was confirmed by good ($r > 0,50$) and significative ($p < 0,05$) linear regression models. Our findings generated an excellent observational dataset that could be used in climatic models and help to answer the gap of interpretations about the climatic control in the isotopic composition of rainfall in inland tropical areas.

Keywords: Stable isotopes of water, rainfall type, micro rain radar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação da dinâmica e dos processos microfísicos e perfil vertical de um radar meteorológico. Formação dos hidrometeoros e ecos do radar em chuvas convectivas (A, C e E) e estratiformes (B, D e F).....	6
Figura 2. Sistemas atmosféricos sinóticos atuantes sobre o Brasil que geram chuva em Rio Claro (SP). (A) mapa de localização do ponto de coleta dos isótopos em Rio Claro, com a América do Sul no quadro superior esquerdo e o estado de São Paulo no quadro inferior esquerdo. (B) Inverno e (C) Verão.	12
Figura 3. Características gerais dos isótopos estáveis da água.....	16
Figura 4. Relação entre as escalas espaciais, temporais dos sistemas atmosféricos e as diferentes escalas de coleta da composição isotópica da chuva.....	19
Figura 5. Tendências isotópicas da chuva de intra-eventos. A(I) tendência em forma de V e ou W, geralmente ocorre em chuvas convectivas A(II); B(I) tendência decrescente, geralmente ocorre em chuvas estratiformes B(II); C tendências em forma de L, D crescente, E estacionária; F Relação entre a composição isotópica da chuva e temperatura (T - °C), umidade relativa do ar (UR - %) e taxa de chuva (TC - mm).	25
Figura 6. Fluxograma resumindo os aparelhos, modelos, plataformas, materiais e atividades desenvolvidas em cada uma das etapas de trabalho.....	29
Figura 7. Procedimentos e materiais de coleta dos intra-eventos de chuva. A estrutura de metal para coleta da chuva, B frasco de plástico que armazena a chuva, C seringa D filtragem da amostra E frasco de plástico com batoque e tampa F conjunto de amostras de um intra-evento etiquetadas.	30
Figura 8. Aparelhos meteorológicos instalados no CEA. À esquerda, Micro Radar de Chuva (MRC); à direita a estação meteorológica compacta (EMC); os dados do MRC são transmitidos e registrados no computador (parte inferior da figura).	33
Figura 9. Processamento de imagens do satélite GOES-16. Imagens de diferentes dimensões foram obtidas: A Américas, B estado de São Paulo, e C pixel sobre o ponto de coleta em Rio Claro para obtenção dos valores de temperatura de brilho (Tb). ..	35
Figura 10. Síntese da classificação dos tipos de chuva. Quadro A ilustra a queda dos hidrometeoros em chuvas estratiformes e ou mistas capturados pelo radar. Quadro B ilustra a queda dos hidrometeoros em chuvas convectivas, não classificadas e ou mistas.	39
Figura 11. Perfil vertical de refletividade corrigida (Zc) do MRC para os tipos de chuva.	

No eixo vertical alturas de medição do MRC e no eixo horizontal o tempo, com destaque para hora inicial e final do intra-evento coletado.	48
Figura 12. Perfil vertical com valores de velocidade de queda (w) do MRC para os tipos de chuva. Idem a figura 11.	48
Figura 13. Box-plots dos parâmetros do MRC de todos os intra-eventos coletados, separados pelos tipos de chuva. Quadrado em vermelho indica a média aritmética.	49
Figura 14. Diferenças entre alturas de medição do MRC para chuvas estratiformes e mistas.	50
Figura 15. Box-plots dos parâmetros meteorológicos da EMC. Quadrado em vermelho indica a média aritmética.	52
Figura 16. Resultados da relação ZxR. A Variação temporal da chuva total da EMC em comparação com os valores de chuva estimados pela Z do MRC; B Melhores valores da chuva estimada a partir das equações da tabela 1; C regressão linear ajustada entre chuva-EMC e chuva-Estimada; D Equações de melhores ajustes com base nos diferentes tipos de chuva, conforme detalhado na tabela 3.	53
Figura 17. Trajetórias do modelo HYSPLIT para todos os intra-eventos coletados.	54
Figura 18. Composição isotópica das chuvas não-classificadas (à esquerda) e mistas (à direita). A, B clássico gráfico entre $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ com as retas meteóricas locais e cores indicando os sistemas atmosféricos formados de chuva, C, D gráfico entre o d -excess e $\delta^{18}\text{O}$ com símbolos indicando a origem das trajetórias do HYSPLIT e E, F o mesmo gráfico anterior com cores indicando as estações do ano.	56
Figura 19. Imagens do satélite GOES-16 sobre o estado de São Paulo. Sistemas atmosféricos e origem do HYSPLIT mencionados na parte de baixo em cada figura. A, C e E de chuvas não-classificadas e B, D e F de chuvas mistas.	58
Figure 20. Seasonal color-coded box plots of $\delta^{18}\text{O}$ (a, b, c), d -excess (d, e, f) and rainfall rate (g, h, i) during day (circle) and night (triangle) time. Symbols are color-coded by moisture origin: Amazon (blue), Atlantic Ocean (brown), and Southwest (black).	60
Figure 21. Temporal plot during high-frequency sampling period (September/2019 - February/2021). (a) MERRA-2 outgoing longwave radiation of daytime versus at night-time (b) day versus night Aqua/AIRS latent heat flux and (c) daily rainfall of daytime versus at night-time.	61
Figure 22. Scatter plots of d -excess and $\delta^{18}\text{O}$ (day and night) combined with RH (a, b,	

c), LCL (d, e, f), BT (g, h, i) and atmospheric systems (j, k, l) data during summer, autumn and spring seasons.	62
Figure 23. Schematic diagram for daytime (orange) and night-time (blue) in convective rainfall during summer.	64
Figure 24. Seasonal regional aspects of convective rainfall. Regional moisture transport by ERA-5 vertical integral of eastward water vapor flux combined with HYSPLIT origin from Amazon (a) Atlantic Ocean (b) and Southwest Brazil (c) for convective events and MERRA-2 outgoing longwave radiation between 2019 and 2021 during summer (d), autumn (e) and spring (f). Rainfall intensity by HYSPLIT trajectories from Amazon (blue), Atlantic Ocean (brown) and Southwest Brazil (purple) (g).	67
Figure 25. General features in the isotope composition of stratiform rainfall. a) scatter among $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ with Local Meteoric Water Line (LMWL) plotted and mentioned and boxplots for b) $\delta^{18}\text{O}$ and seasons c) $\delta^{18}\text{O}$ with atmospheric systems d) $\delta^{18}\text{O}$ and HYSPLIT origin and e) <i>d</i> -excess values and HYSPLIT origin. Gray squares are arithmetic mean values and circle, diamond and squares are depleted, moderate and enriched $\delta^{18}\text{O}$ groups.	70
Figure 26. Scatter plots of <i>d</i> -excess and $\delta^{18}\text{O}$ related to a) AWS rain rates b) AWS relative humidity (RH) c) lifting condensation level (LCL) based on AWS RH and temperature	72
Figure 27. Fall velocity (<i>w</i>) of the Micro Rain Radar (MRR) vertical profile indicating the vertical structure of stratiform rainfall events Isotopic events separated into (a, b) enriched (c, d) moderate and (e, f) depleted.	73
Figure 28. Matrix correlation between isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and <i>d</i> -excess) and meteorological variables by Pearson.....	74
Figure 29. Trends temporal variations of brightness temperature (BT) and AWS rain rates during isotope events separated into (a, b) enriched group (c, d) moderate and (e, f) depleted.	75
Figure 30. Enriched isotopic group (mean $\delta^{18}\text{O}$ value of 0.1‰). Sequence of frames – GOES-16 satellite imagery from 3, 2, 1 hours before the occurrence of rainfall in Rio Claro station and after from start isotope collection, 1 hour and last image of rainfall.	76
Figure 31. Moderate isotopic group (mean $\delta^{18}\text{O}$ value of -5.6‰). Refer to Figure 30 for legend description.	76
Figure 32. Depleted isotopic group (mean $\delta^{18}\text{O}$ value of -11.1‰). Refer to Figure 30	

for legend description.	77
Figure 33. Cloud dynamic system observed with GOES-16 image related to the change in variations over brightness temperature (BT) and isotopic composition of stratiform rainfall.....	77
Figure 34. Ratio of water liquid over ice by ERA 5 reanalysis during developing, mature and dissipating phases of life cycle in stratiform rainfall.	79
Figura 35. Composição isotópica e retas meteóricas locais (RML) para chuvas convectivas em laranja (A) e estratiformes em azul (B), com box-plot de $\delta^{18}\text{O}$ (C), $\delta^2\text{H}$ (D) e <i>d</i> -excess (E).	82
Figura 36. Tendências $\delta^{18}\text{O}$ (A, C) e <i>d</i> -excess (B, D) e taxas de chuvas (TC) da estação meteorológica compacta (emc) na parte superior e do micro radar de chuva (mrc) na parte inferior para chuvas convectivas (cor laranja e símbolos quadrados) e estratiformes (cor azul e símbolos em círculos)	84
Figura 37. Melhores correlações entre a composição isotópica e as variáveis meteorológicas para o conjunto de dados das chuvas estratiformes e convectiva-estratiforme.	84
Figura 38. Comparação entre os valores observados e modelados de $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ (A, C, E) e <i>d</i> -excess (B, D, F) para as chuvas convectivas (laranja), estratiformes (azul) e conjunto de dados convectiva-estratiforme (cinza).	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Síntese da coleta de amostras dos intra-eventos.....	31
Tabela 2. Resumo dos parâmetros meteorológicos do Reanalysis.....	37
Tabela 3. Equações de refletividade e precipitação utilizadas com base nos tipos de chuva.....	42
Table 4. Spearman correlations between isotopic composition and meteorological data.	63
Table 5. Meteorological data for summer (day and night), autumn and spring.....	65
Table 6. Statistics descriptive for meteorological variables separate into isotopic groups (according to figure 25).....	71
Tabela 7. Estatística descritiva dos tipos de chuva.	82
Tabela 8. Resultados dos modelos de regressão.	86

LISTA DE ABREVIATURAS

ABI – Advanced Baseline Imager
AS – América do Sul
ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul
ASPS – Alta Subtropical do Pacífico Sul
AWS – Automatic Weather Stations
BB – Banda brilhante do radar
BT – Brightness temperature
CAL – Conteúdo de água líquida do radar
Cb – *Cumulonimbus*
CEA – Centro de Estudos Ambientais
CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
d – *d*-excess
DGA – Departamento de Geologia Aplicada
EMC – Estação meteorológica compacta
ENOS – El Niño-Oscilação Sul
FF – Frente fria
GEO – Group on Earth Observations
GMWL – Global meteoric water line
GNIP – Global Network of Isotopes in Precipitation
GOES-16 – Geostationary Operational Environmental Satellite
HF – High-frequency
HYSPLIT – Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory
IAEA – International Atomic Energy Agency
IGc-USP – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo
INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais
IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
IR – Infravermelho
JBANAS – Jatos de Baixos Níveis da América do Sul
LCL – Lifting condensation level
LI – Linhas de instabilidade
LIA – Laboratório de Isótopos Ambientais
LMWL – Local meteoric water line
MRC – Micro radar de chuva

MRR – Micro rain radar

NBB – Não detecção da banda brilhante

Ns – *Nimbostratus*

OLR – Outgoing longwave radiation

r – Coeficiente de correlação

R² – Coeficiente de determinação

Radar – Radio Detection and Ranging

RH – Relative humidity

RML – Reta meteórica local

Sc – *Stratocumulus*

Tb – Temperatura de brilho do GOES-16

TCemc – Taxa de chuva da estação meteorológica compacta

TCmrc – Taxa de chuva do micro radar de chuva

Tpo – Temperatura do ponto de orvalho

UR – Umidade relativa do ar

VD – Velocidade dopler

VSMOW – Vienna Standard Mean Ocean Water

w – Velocidade de queda do micro radar

w-alt – Velocidade de queda do micro radar medido em altura

Z – Refletividade do micro radar

Zc – Refletividade corrigida do micro radar

Γ_d - Taxa adiabática seca

Γ_w – Taxa adiabática úmida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	4
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1	Formação de nuvens convectivas e estratiformes.....	5
3.2	Identificação de tipos de chuva com radares meteorológicos.....	7
3.3	Sistemas atmosféricos regionais e tipos de chuva na área de estudo.....	11
3.4	Isótopos estáveis na chuva.....	15
3.4.1	<i>Fracionamento isotópico e formação de chuva.....</i>	<i>17</i>
3.4.2	<i>Escalas espaciais e temporais na composição isotópica da chuva....</i>	<i>19</i>
3.4.3	<i>Tendências isotópicas dos Intra-eventos de chuva.....</i>	<i>23</i>
3.4.4	<i>Composição isotópica da chuva mensal e diária em Rio Claro.....</i>	<i>27</i>
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
4.1	Amostragem e análise isotópica.....	29
4.2	Aquisição de dados meteorológicos.....	32
4.2.1	<i>Micro Radar de Chuva e estação meteorológica compacta.....</i>	<i>32</i>
4.2.2	<i>Imagens do satélite GOES-16.....</i>	<i>34</i>
4.2.3	<i>Boletins técnicos do CPTEC-INPE.....</i>	<i>35</i>
4.2.4	<i>Modelo HYSPLIT.....</i>	<i>36</i>
4.2.5	<i>Reanalysis.....</i>	<i>36</i>
4.3	Classificação dos tipos de chuva.....	37
4.3.1	<i>Relação entre refletividade (Z) e Intensidade de Chuva (R).....</i>	<i>41</i>
4.4	Análise sinótica, formação e ciclo de vida das chuvas.....	42
4.5	Testes estatísticos.....	43
4.6	Estrutura de apresentação dos resultados.....	46
5	RESULTADOS.....	47
5.1	Estrutura vertical e dados de superfície dos tipos de chuva.....	47
5.1.2	<i>Comparando a taxa de chuva da EMC versus MRC.....</i>	<i>52</i>
5.2	Intra-eventos com resultados isotópicos.....	54
5.2.1	<i>Fontes de umidade e sistemas atmosféricos.....</i>	<i>54</i>

5.2.2	<i>Interpretação dos controles meteorológicos sobre a composição isotópica</i>	55
5.2.2.1	<u>Chuvas não classificadas e mistas</u>	55
5.2.2.1.1	Resultados.....	55
5.2.2.1.2	Discussão.....	57
5.2.2.2.	<u>Chuvas convectivas</u>	59
5.2.2.2.1	Results.....	59
5.2.2.2.2	Discussion.....	66
5.2.2.3.	<u>Chuvas estratiformes</u>	69
5.2.2.3.1	Results.....	69
5.2.2.3.2	Discussion.....	78
5.2.2.4	<u>Comparação entre chuvas convectivas e estratiformes</u>	81
5.2.2.4.1	Resultados.....	81
5.2.2.4.2	Discussão.....	88
6.	CONCLUSÃO	91
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

1 INTRODUÇÃO

A interferência antrópica nos processos e ciclos naturais, associados a dinâmica climática do local ao global, têm sido tema preocupante de agendas governamentais e de interesse em diversas áreas da ciência, como hidrologia, meteorologia, ecologia, dentre outras, no cerne de respostas e soluções diante das consequências das mudanças climáticas.

No Brasil, novas projeções reportadas pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) no relatório-2021, projetaram aumento na frequência de eventos extremos e mudanças no padrão dos regimes de chuva, aumento em um ou mais aspectos entre seca, aridez e queimadas, afetando setores da agricultura, silvicultura, saúde e ecossistemas (IPCC, 2021; MARENGO, 2021).

Neste contexto, há grande exigência e necessidade de técnicas e ferramentas mais robustas que possibilitem uma melhor compreensão dos elementos e processos naturais do sistema superfície-atmosfera, com objetivo de alcançar uma visão cada vez mais efetiva e aplicável para uma gestão integrada do meio ambiente e dos recursos hídricos.

Monitoramentos de longo prazo, permitem uma melhor avaliação da sucessão dos tipos de tempo, possibilitando uma distinção entre fenômenos que são similares/repetitivos e extremos/anômalos. No caso dos isótopos estáveis, o estabelecimento da *Global Network of Isotopes in Precipitation* (GNIP) (http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html) a partir de 1960, vem contribuindo para realização de estudos sobre a composição isotópica da chuva ao redor de todo globo terrestre (CRAIG, 1961; DANSGAARD, 1964; ROZANSKI; ARAGUÁS-ARAGUÁS; GONFIANTINI, 1993), principalmente em regiões de altas latitudes, onde as interpretações sobre os controles climáticos foram muito bem definidas, como à forte correlação com a temperatura (efeito de temperatura) (DANSGAARD, 1964).

Para regiões tropicais, os controles climáticos ainda não são muito bem explicados. Um dos principais controles mencionados na literatura, é o efeito de quantidade, em que ocorre uma correlação inversa entre a composição isotópica e a quantidade de chuva (DANSGAARD, 1964). Ademais, a maioria dos estudos em áreas tropicais foram realizados em pontos de coleta de influência marinha, o que torna a área de estudo deste trabalho (um local de influência continental), relevante para avaliação da composição isotópica da chuva, possibilitando expandir as interpretações realizadas anteriormente nas áreas tropicais marinhas.

Dentre estas interpretações, que definem os controles climáticos sobre a variabilidade isotópica da chuva, a formação de diferentes tipos de chuva, baseado na microfísica de formação distinta entre chuvas convectivas versus estratiformes (AGGARWAL et al., 2016), tem sido amplamente utilizada, principalmente em áreas marítimas tropicais e subtropicais (MUNKSGAARD et al., 2019, 2020; SUN; SHANAHAN; PARTIN, 2019).

Além da microfísica dos tipos de chuva, o início do processo de formação das chuvas também tem se destacado como fator importante, relacionado a atividade convectiva (dinâmica de ventos, temperatura e vapor modulando o processo de condensação) e a profundidade da convecção (que representa o grau de extensão vertical da nuvem, assim, quanto mais alto o topo dela, mais ‘profunda’ é a convecção e rigorosa a dinâmica de formação dos hidrometeoros) (RISI; BONY; VIMEUX, 2008; RISI et al., 2010a; KURITA, 2013; LEKSHMY et al., 2014; LACOUR et al., 2018).

A importância da distinção dos tipos de chuva, convectiva-estratiforme, está relacionada à acurácia da previsão de precipitação e na avaliação dos efeitos da convecção tropical na circulação atmosférica global (HOUZE, 1997). Para isso estudos de campo com resoluções espaço-temporais adequados aos processos dinâmicos e microfísicos da nuvem, devem e estão sendo realizados para subsidiar os modelos de previsão numérica e simulação climática.

Deste modo, a evolução das técnicas de determinação do conteúdo isotópico e desenvolvimento de melhores coletores (GRÖNING et al., 2012), favorecem a investigação de diferentes escalas de coleta e monitoramento (CELLE-JEANTON; TRAVI; BLAVOUX, 2001), mensal, semanal, diária e intra-eventos ou alta frequência (em minutos) permitindo explorar os processos de formação de chuva em diferentes óticas (e escalas espaço-temporais dos sistemas atmosféricos), que se complementam, possibilitando uma convergência de interpretações sobre a variabilidade isotópica e a dinâmica do tempo.

Kurita *et al.*, (2009) demonstrou que a assinatura isotópica diária detalha as interpretações da coleta mensal, preenchendo lacunas relacionadas aos efeitos de evaporação abaixo da base da nuvem. No entanto, no que se refere ao efeito de quantidade, a coleta mensal potencializa a correlação com a quantidade de chuva, devido a somatória de eventos ao longo do mês de coleta. O mesmo não ocorre nos dados diários, que representa a assinatura de um ou poucos eventos de chuva (KURITA et al., 2009).

Em escalas de coleta mais curtas, a intensidade de chuva também não tem sido bem correlacionada com a composição isotópica, embora tal relação ainda deva ser explorada (MULLER et al., 2015), uma vez que fatores concorrentes (ciclo de vida de um sistema de chuva, tipo de massa de ar, história da chuva e tipo de tempestade) sobre a composição isotópica dificultam a avaliação. Estes mesmos autores, encontraram uma relação com a variabilidade da intensidade de chuva, em que elevadas taxas em superfície tinham como resposta empobrecimento na composição isotópica, associado a uma menor influência de processos evaporativos, devido ao maior tamanho das gotas de chuva (MULLER et al., 2015).

Desde 2013, com monitoramento mensal e diário (2014) da composição isotópica da chuva em Rio Claro (SP), foi demonstrado que os processos de escala regional controlam a variabilidade isotópica, de maneira distinta ao longo das estações do ano, devido a atuação de diferentes sistemas atmosféricos, Frentes Frias (FF) e Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), e condições de umidade disponível (DOS SANTOS et al., 2019; GASTMANS et al., 2017; SANTOS et al., 2019a, 2019b).

Com a evolução da composição isotópica da chuva em intra-eventos e informações do Micro Radar de Chuva (MRC), será possível confirmar esta relação demonstrada nas escalas maiores, e principalmente avaliar como estes sistemas atmosféricos interagem com as condições de umidade distintas (estação seca com menor umidade disponível, e chuvosa com maior umidade), para a formação de diferentes tipos de chuva. Além da interpretação de processos locais, como evaporação e troca isotópica à medida que a gota de chuva cai abaixo da base da nuvem, unificando as diferentes interpretações (mensal, diária e de intra-eventos) sobre a variabilidade da composição isotópica da chuva em Rio Claro (SP).

Nesse sentido, o presente estudo compõe uma avaliação poderosa, que contribui de maneira integradora na interpretação dos tipos de chuva para a hidrologia isotópica tropical, bem como no subsídio de dados observacionais e quantitativos que podem ser utilizados para modelagem de sistemas convectivos localizados, promovendo arcabouço para discussão sobre os controles climáticos em áreas tropicais, e no entendimento da dinâmica de chuvas sobre a região central do estado de São Paulo, que tem começado a sofrer com a diminuição das chuvas, gerando problemas de crise hídrica (EMPINOTTI; BUDDS; AVERSA, 2019; GETIRANA; LIBONATI; CATALDI, 2021).

6. CONCLUSÃO

A combinação de amostras em alta frequência e dados meteorológicos na escala de minutos, com utilização de instrumentos na superfície (estação meteorológica compacta) informação da estrutura vertical da chuva (micro radar) até o topo da nuvem (imagens do GOES-16), possibilitou refinar as análises feitas na escala mensal e diária, entendendo a grande variabilidade da composição isotópica fora de um contexto sazonal (empobrecida na estação chuvosa versus enriquecida na seca) e apenas regional (fonte de umidade predominante da Amazônia versus do Oceano Atlântico, respectivamente), interrelacionado processos regionais e locais, tornando possível desvendar a história da chuva em Rio Claro.

Esta história tem sua origem na principal fonte de umidade da Terra, os oceanos. No caso deste trabalho, quando a água evaporou do Oceano Atlântico, ela percorreu três origens observadas com as trajetórias do HYSPLIT. O próprio Oceano Atlântico, percorrendo um caminho até o estado de São Paulo impulsionado pela presença da Alta Subtropical do Atlântico Sul, a floresta Amazônica que recebe umidade do oceano pelos ventos alísios, reevaporando umidade para atmosfera, sendo levada ao choque com os Andes, mudando sua rota, transportada até a região centro-sul do Brasil, e em menor número, trajetórias do Sul do Brasil, associada a passagem de frentes frias pelo litoral sul brasileiro.

A perda de isótopos pesados ocorreu de maneira mais acentuada em trajetórias associadas a Amazônia, devido ao processo de reevaporação da floresta e ao longo caminho continental que está umidade percorreu, interagindo com a circulação atmosférica regional e atividade convectiva durante o verão formando chuvas que possibilitaram esta perda em isótopos pesados. Este mecanismo foi menor quando as trajetórias foram provenientes direto do Oceano Atlântico e do Sul do Brasil, porque percorrem um caminho menor e menos continental do que as trajetórias da Amazônia.

Todo este mecanismo de transporte é caracterizado pela formação de chuvas contínuas ao longo do caminho (*continuous rainout*) produzindo uma história pretérita, aqui denominada de processos ou influência regional, que compõe o vapor que chega no estado de São Paulo e interage com os sistemas atmosféricos atuantes (Frentes Frias, cavados, zonas de baixa pressão, Zona de Convergência do Atlântico Sul, Instabilidades) produzindo os sistemas de chuvas, descritos e classificados pelo micro radar e imagens do GOES-16, em convectivas (cluster de 40 pixels de temperatura de brilho do GOES-16 menor que -38°C , 10mm de chuva em 1 hora e refletividade do

radar variada), estratiformes (presença da banda brilhante nos perfis do radar), mistas (mistura de tipos de chuva durante um mesmo evento) e não-classificadas (não observado nenhuma das características das demais chuvas).

A passagem e evolução destes diferentes sistemas atmosféricos e diferentes tipos de chuva produziu uma grande variabilidade na assinatura isotópica dos intra-eventos, sendo consequência da história pretérita da umidade que chegou no estado de São Paulo, amplificada ou modificada localmente durante a formação dos tipos de chuva, até a queda de suas gotas na superfície.

Chuvas não-classificadas e mistas tem sua história isotópica caracterizadas, respectivamente, por valores de $\delta^{18}\text{O}$ refletindo os efeitos regionais, com a combinação das trajetórias e sistemas atmosféricos, enquanto a mistura de processos convectivos (convecção antiga) e estratiformes durante um mesmo evento resultou em composição isotópica variada, descaracterizando os efeitos regionais pretéritos.

Em chuvas convectivas a umidade regional foi modificada durante o dia, devido a diferenças dia-noite da atividade convectiva, produzindo nuvens com desenvolvimento vertical distintos, mais profundo e com menor umidade na superfície durante o dia, resultando em uma história isotópica marcada por processos de evaporação durante a queda das gotas de chuva, diminuindo os valores de *d*-excess e enriquecendo os de $\delta^{18}\text{O}$ em relação à noite, com predominância de trajetórias provenientes da Amazônia (perda de isótopos pesados), produzindo valores de $\delta^{18}\text{O}$ fortemente empobrecidos.

O ciclo de vida, caracterizado pela fase de desenvolvimento de uma nuvem, tornando-se madura, até a fase de dissipação, foi observado nas chuvas estratiformes, possibilitando identificar a importância da evolução espacial e temporal da chuva, resultando em uma história isotópica que perdeu cada vez mais isótopos pesados conforme avançou em seu ciclo de vida, tornando-se muito empobrecido na fase de dissipação. Em oposição, durante a fase de desenvolvimento, os processos de influência regional foram modificados por processos evaporativos, em condições de menor umidade e intensidade de chuva próximo a superfície, resultando em um $\delta^{18}\text{O}$ mais enriquecido e de menor *d*-excess.

A atuação das frentes frias ao longo de todo ano, produziu todos os tipos de chuva classificados neste trabalho, resultando em uma composição isotópica de empobrecida a enriquecida caracterizando-se, como sistema atmosférico mais importante para a geração da variabilidade isotópica no recorte temporal deste estudo.

Sistemas atmosféricos como a Zona de Convergência do Atlântico do Sul e instabilidades, ambos relacionados a atividade convectiva termal, produziram eventos mais empobrecidos, o que confirma avaliações anteriores, sobre a importância da atividade convectiva para o empobrecimento isotópico. Além disso, a atividade convectiva tem um papel fundamental para a formação das chuvas durante o verão, e deve ter uma atenção especial em virtude da possível geração de eventos extremos e de danos a população.

Portando, a história isotópica da chuva têm nos processos atmosféricos de escala local, a evaporação durante a queda das gotas de chuva o principal controle meteorológico para enriquecer a composição isotópica da chuva, enquanto no processo de destilação Rayleigh com perda de isótopos pesados para empobrecer a composição isotópica da chuva, seja pelo caminho proveniente da Amazônia, principal fator regional e pelos processos de formação local das chuvas convectivas durante a noite e estratiformes na fase de dissipação.

A comparação entre os tipos de chuvas, convectivas e estratiformes, demonstrou que chuvas convectivas tendem a ter valores ligeiramente mais negativos do que chuvas estratiformes, no entanto não é possível afirmar com clareza, como esta informação possa ser estendida para escalas de coleta maiores, uma vez que não foram coletados intra-eventos de todos os eventos que ocorreram em Rio Claro durante o período de amostragem. Apesar disso, as interpretações dos controles meteorológicos sobre a composição isotópica foram confirmadas com o uso de modelos de regressão lineares, de resultado significativo e de bons valores modelados em relação aos observados, indicando que os tipos de chuvas têm características distintas importantes que podem ser modeladas, abrindo perspectivas para estudos futuros. Quando unido em um único banco de dados, o modelo perdeu robustez, o que pode explicar a dificuldade encontrada na escala diária em estudos anteriores de interpretar os diferentes tipos de chuva, explicando a falta correlação observada entre a composição isotópica e as frações convectiva e estratiformes.

Por fim, reforçamos a necessidade de usar a alta frequência em estudos futuros nos trópicos para avançar na interpretação dos controles meteorológicos sobre a composição isotópica e melhorar a observação com dados refinados como utilizados neste trabalho, gerando conhecimento e informação para modelar processos atmosféricos de formação de chuva, como resposta aos efeitos das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAR, E. M.; KARNIELI, A.; SANDLER, B. Z.; ISSAR, A.; WOLF, M.; LANDSMAN, L. **A mechanical sequential rain sampler for isotopic and chemical analysis**. Final Scientific Rep., Contract 5542/RO/Rb, IAEA, Vienna, Austria, 1991, 32 p.

AGGARWAL, P. K.; ROMATSCHKE, U.; ARAGUAS-ARAGUAS, L.; BELACHEW, D.; LONGSTAFFE, 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. DOI: [10.1038/ngeo2739](https://doi.org/10.1038/ngeo2739).

ANDRADE, K. M.; CAVALCANTI, I. F. A. Atmospheric characteristics that induce extreme precipitation in frontal systems over Southeastern Brazil during summer: Observations and atmospheric model simulation. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 14, p. 5368–5385, 2018. DOI: [10.1002/joc.5744](https://doi.org/10.1002/joc.5744).

AYRES, M. **Elementos de Bioestatística - A Seiva do Açaizeiro**. 2ed. ed. Belém: CNPq/MCT, 2011, 531p.

BARRAS, V.; SIMMONDS, I. Observation and modeling of stable water isotopes as diagnostics of rainfall dynamics over southeastern Australia. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 114, n. 23, 2009. DOI: [10.1029/2009JD012132](https://doi.org/10.1029/2009JD012132).

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosphere, weather and climate**. v. 9th ed. London: Routledge, 2010, 536p.

BONY, S.; RISI, C.; VIMEUX, F. Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of precipitation and water vapor in the tropics: 1. Radiative-convective equilibrium and Tropical Ocean-Global Atmosphere-Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment (TOGA-COARE). **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 113, n. 19, p. 1–21, 2008. DOI: [10.1029/2008JD009942](https://doi.org/10.1029/2008JD009942).

BRAGA, Ramon Campos; VILA, Daniel Alejandro. Investigating the Ice Water Path in Convective Cloud Life Cycles to Improve Passive Microwave Rainfall Retrievals. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 4, p. 1486–1497, 2014. DOI: [10.1175/jhm-d-13-0206.1](https://doi.org/10.1175/jhm-d-13-0206.1).

BYERS, H. R.; BRAHAM, R. R. **Thunderstorms and the Thunderstorm Project**. Report of the Thunderstorm Project. U.S. Government Printing Office. 1949, 287p.

CALHEIROS, A. J. P.; MACHADO, L. A. T. Cloud and rain liquid water statistics in the CHUVA campaign. **Atmospheric Research**, v. 144, p. 126–140, 2014. DOI: [10.1016/j.atmosres.2014.03.006](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.03.006).

CATTO, J. L.; JAKOB, C.; BERRY, G.; NICHOLLS, N. Relating global precipitation to atmospheric fronts. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 10, p. 1–6, 2012. DOI: [10.1029/2012GL051736](https://doi.org/10.1029/2012GL051736).

CAVALCANTI, I. F. A; KOUSKY, V. E. **Climatology of South American Cold Fronts**. p. 4–5, 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/37678964> **Climatology of South America**

[n cold fronts.](#)

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. **Tempo e Clima no Brasil**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2009, 464p.

CELLE-JEANTON, H.; GONFIANTINI, R.; TRAVI, Y.; SOL, B. Oxygen-18 variations of rainwater during precipitation: Application of the Rayleigh model to selected rainfalls in Southern France. **Journal of Hydrology**, v. 289, n. 1–4, p. 165–177, 2004. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2003.11.017](#).

CELLE-JEANTON, H.; TRAVI, Y.; BLAVOUX, B.. Isotopic typology of the precipitation in the Western Mediterranean Region at three different time scales. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 7, p. 1215–1218, 2001. DOI: [10.1029/2000GL012407](#).

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

COPLEN, T. B.; NEIMAN, P. J.; WHITE, A. B.; LANDWEHR, J. M.; RALPH, F. M.; DETTINGER, M. D. Extreme changes in stable hydrogen isotopes and precipitation characteristics in a landfalling Pacific storm. **Geophysical Research Letters**, v. 35, p. 1–5, 2008. DOI: [10.1029/2008GL035481](#).

COPLEN, T. B.; NEIMAN, P. J.; WHITE, A. B.; RALPH, F. M. Categorisation of northern California rainfall for periods with and without a radar brightband using stable isotopes and a novel automated precipitation collector. **Tellus B: Chemical and Physical Meteorology**, v. 67, 2015. DOI: [10.3402/tellusb.v67.28574](#).

CRAIG, H. and GORDON, L. I. **Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and marine atmosphere**. Pages 9-130, 1965, in *Stable isotopes in oceanographic studies and paleotemperatures*. Laboratory of Geology and Nuclear Science, Pisa, Italy.

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

DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation. **Tellus**, v. 16, n. 4, p. 436–468, 1964. DOI: [10.3402/tellusa.v16i4.8993](#).

DOS SANTOS, V.; GASTMANS, D.; SÁNCHEZ-MURILLO, R.; GOZZO, L. F.; BATISTA, L. V.; MANZIONE, R. L.; MARTINEZ, J. Regional atmospheric dynamics govern interannual and seasonal stable isotope composition in southeastern Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 579, p. 124-136, 2019. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2019.124136](#).

DOS SANTOS, V.; MARSHALL F., P.; MANCINI, L. H.; COTA, S. D. S.; DE LIMA, G. B.; RODRIGUES, R. G.; KIRCHHEIM, R. E.; SANCHÉZ-MURILLO, R.; GASTMANS, D. Distinguishing the Regional Atmospheric Controls on Precipitation Isotopic Variability in the Central-Southeast Portion of Brazil. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 39, n. 10, p. 1693–1708, 2022. DOI: [10.1007/s00376-022-1367-0](#).

DUBREUIL, V.; FANTE, K. P. PLANCHON, O.; SANT'ANNA, J. L. Les types de climats

annuels au Brésil: une application de la classification de Köppen de 1961 à 2015. **Échogéo**, v. 41, p. 0–26, 2017. DOI: [10.4000/echogeo.15017](https://doi.org/10.4000/echogeo.15017).

EMPINOTTI, V. L.; BUDDS, J.; AVERSA, M. Governance and water security: The role of the water institutional framework in the 2013–15 water crisis in São Paulo, Brazil. **Geoforum**, v. 98, p. 46–54, 2019. DOI: [10.1016/j.geoforum.2018.09.022](https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.09.022).

ENDRIES, J. L.; PERRY, L. B.; YUTER, S. E.; SEIMON, A.; ANDRADE-FLORES, M.; WINKELMANN, R.; QUISPE, N.; RADO, M.; MONTOYA, N.; VELARDE, F.; ARIAS, S. Radar-observed characteristics of precipitation in the tropical high andes of Southern Peru and Bolivia. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 57, n. 7, p. 1441–1458, 2018. DOI: [10.1175/JAMC-D-17-0248.1](https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0248.1).

FEDORAVA, N. **Meteorologia Sinótica**. 1 ed. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária, UFPel, v. 500, 1999, 260 p.

FORTUNE, M. A.; KOUSKY, V. E. Two Severe Freezes in Brazil: Precursors and Synoptic Evolution. **Monthly Weather Review**, v. 111, n. 1, p. 181-196, 1983.

FRAGOSO, M. A Utilizacao das imagens de radar meteorologico em climatologia. **Finisterra**, v. 31, n. 61, p. 29-42, 1996. DOI: [10.18055/finis1808](https://doi.org/10.18055/finis1808).

GADGIL, S. The Indian monsoon and its variability. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 31, p. 429-467, 2003. DOI: [10.1146/annurev.earth.31.100901.141251](https://doi.org/10.1146/annurev.earth.31.100901.141251).

GAMACHE, J. F.; HOUZE JR., R. A. Mesoscale Air Motions Associated with a Tropical Squall Line. **Monthly Weather Review**, v. 110, p. 118-135, 1982.

GARREAUD, René D. Cold air incursions over subtropical South America: Mean structure and dynamics. **Monthly Weather Review**, v. 128, n. 7 II, p. 2544-2559, 2000. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2000\)128%3C2544:CAIOSS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2000)128%3C2544:CAIOSS%3E2.0.CO;2).

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, 2017. DOI: [10.1080/10256016.2017.1305376](https://doi.org/10.1080/10256016.2017.1305376).

GEDZELMAN, S. D.; LAWRENCE, J. R. The Isotopic Composition of Precipitation from Two Extratropical Cyclones. **American Meteorological Society**, v. 118, p. 495-509, 1990. DOI: [10.1175/1520-0493\(1990\)118,0495:TICOPF.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1990)118,0495:TICOPF.2.0.CO;2).

GEDZELMAN, S.; LAWRENCE, J.; GAMACHE, J.; BLACK, M.; HINDMAN, E.; BLACK, R.; DUNION, J.; WILLOUGHBY, H.; ZHANG, X.. Probing hurricanes with stable isotopes of rain and water vapor. **Monthly Weather Review**, v. 131, n. 6, p. 1112-1127, 2003. DOI: [10.1175/1520-0493\(2003\)131<1112:PHWSIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<1112:PHWSIO>2.0.CO;2).

GELARO, R.; MCCARTY, W.; SUÁREZ, M. J.; TODLING, R.; MOLOD, A.; TAKACS, L.; RANDLES, C. A.; DARMENOV, A.; BOSILOVICH, M. G.; REICHLE, R.; WARGAN,

K.; COY, L.; CULLATHER, R.; DRAPER, C.; AKELLA, S.; BUCHARD, V.; CONATY, A.; SILVA, A. M. S.; GU, W.; KIM, G.K.; KOSTER, R.; LUCCHESI, R.; MERKOVA, D.; NIELSEN, J. E.; PARTYKA, G.; PAWSON, S.; PUTMAN, W.; RIENECKER, M.; SCHUBERT, S. D.; SIENKIEWICZ, M.; ZHAO, B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2). **Journal of Climate**, v. 30, n. 14, p. 5419-5454, 2017. DOI: [10.1175/JCLI-D-16-0758.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1).

GETIRANA, Augusto; LIBONATI, Renata; CATALDI, Marcio. Brazil is in water crisis — it needs a drought plan. **Nature**, v. 600, n. 7888, p. 218–220, 2021. DOI: [10.1038/d41586-021-03625-w](https://doi.org/10.1038/d41586-021-03625-w).

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. DOI: [10.1029/2010GL043712](https://doi.org/10.1029/2010GL043712).

GOZZO, L. F.; PALMA, D. S.; CUSTÓDIO, M. S.; DRUMOND, A. Padrões Climatológicos Associados a Eventos de Seca no Leste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 28, p. 321-341, 2021. DOI: [10.5380/rbclima.v28i0.76268](https://doi.org/10.5380/rbclima.v28i0.76268).

GRAF, P.; WERNLI, H.; PFAHL, S.; SODEMANN, H. A new interpretative framework for below-cloud effects on stable water isotopes in vapour and rain. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 19, n. 2, p. 747-765, 2019. DOI: [10.5194/acp-19-747-2019](https://doi.org/10.5194/acp-19-747-2019).

GRÖNING, M.; LUTZ, H. O.; ROLLER-LUTZ, Z.; KRÁLIK, M.; GOURCY, L.; PÖLTENSTEIN, L. A simple rain collector preventing water re-evaporation dedicated for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ analysis of cumulative precipitation samples. **Journal of Hydrology**, v. 448-449, p. 195-200, 2012. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2012.04.041](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.041).

HAN, T.; ZHANG, M.; WANG, S.; QU, D.; DU, Q. Sub-hourly variability of stable isotopes in precipitation in the marginal zone of East Asian monsoon. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 8, 2020. DOI: [10.3390/W12082145](https://doi.org/10.3390/W12082145).

HAN, X.; LANG, Y.; WANG, T.; CONG-QIANG, L.; LI, F.; WANG, F.; GUO, Q.; LI, S.; LIU, M.; WANG, Y.; XU, A. Temporal and spatial variations in stable isotopic compositions of precipitation during the typhoon Lekima (2019), China. **Science of the Total Environment**, v. 762, p. 143143, 2021. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.143143](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143143).

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYL, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; NICOLAS, J.; PEUBEY, C.; RADU, R.; SCHEPERS, D.; SIMMONS, A.; SOCI, C.; ABDALLA, S.; ABELLAN, X.; BALSAMO, G.; BECHTOLD, P.; BIAVATI, G.; BIDLOT, J.; BONAVITA, M.; DE CHIARA, G.; DAHLGREN, P.; DEE, D.; FUENTES, M.; GEER, A.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S.; HOGAN, R. J.; LUPU, E.; RADNOTI, G.; ROSNAY, P.; ROZUM, I.; VAMBORG, F.; VILLAUME, S.; THÉPAUT, J. N. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020. DOI: [10.1002/qj.3803](https://doi.org/10.1002/qj.3803).

HORITA, J.; ROZANSKI, K.; COHEN, S. Isotopes in Environmental and Health Studies Isotope effects in the evaporation of water: a status report of the Craig–Gordon model

Isotopes in Environmental and Health Studies, v. 44, n. 1, p. 23-49, 2008. DOI: [10.1080/10256010801887174](https://doi.org/10.1080/10256010801887174).

HOUZE, R. A. JR. **Cloud dynamics**. International Geophysics Series, 53, Waltham, Academic Press Limited, 1993, 573p.

HOUZE, R. A. JR. Observed structure of mesoscale convective systems and implications for large-scale heating. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, v. 115, p. 425-461, 1989.

HOUZE, R. A. JR. Stratiform precipitation in regions of convection: A Meteorological Paradox? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, p. 2179–2195, 1997.

IPCC: Climate Change 2021: **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Masson-Delmonte, V. et al. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2021, 2391p. DOI: [10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896).

JASECHKO, S. Global Isotope Hydrogeology-Review. **Reviews of Geophysics**, v. 57, n. 3, p. 835-965, 2019. DOI: [10.1029/2018RG000627](https://doi.org/10.1029/2018RG000627).

LI, J.; TAO T.; PANG, Z.; ZHONGHE, P.; TAN, M.; YANLONG, K.; DUAN, W.; ZHANG, Y. Identification of Different Moisture Sources through Isotopic Monitoring during a Storm Event. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 2015, p. 1918-1927, 2015. DOI: 10.1175/JHM-D-15-0005.1.

JONES, D. M. A. Rainfall drop size-distribution and radar reflectivity. **Research Report n°6**. University of Illinois, Urbana, Illinois, 1956, p. 20.

JOSS, V. J. & WALDVOGEL, A. Ein Spektrograph für Niederschlagstropfen mit Automatischer Auswertung. **Pure Appl. Geophys.**, v. 68, p. 240-246, 1967.

JOSS, V. J. & WALDVOGEL, A. A method to improve the accuracy of radar-measurements by radar. Tucson, AZ, **Amer. Meteor. Soc. In: PROC. 13TH RADAR METEOROLOGY CONF.** Tucson: American Soc, p. 237-238, 1970.

JOSS, V. J. & WALDVOGEL, A. The Accuracy of Daily Rainfall Measurements by Radar. In: 1991, **Montreal. Anais**. Montreal: 13 th Radar Meteorology Conf., 448-451, 1991.

JOUZEL, J.; MERLIVAT, L. Deuterium and oxygen-18 in precipitation: modeling of the isotopic effects during snow formation. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. D7, p. 749-757, 1984. DOI: [10.1029/jd089id07p11749](https://doi.org/10.1029/jd089id07p11749).

KODAMA, Yasumasa. 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. DOI: [10.1248/cpb.37.3229](https://doi.org/10.1248/cpb.37.3229).

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.

KUMAR, S.; CASTILLO-VELARDE, C. D.; FLORES ROJAS, J. L.; MOYA-ÁLVAREZ, A.; MARTÍNEZ CASTRO, D.; SRIVASTAVA, S.; SILVA, Y. Precipitation structure during various phases the life cycle of precipitating cloud systems using geostationary satellite and space-based precipitation radar over Peru. **GIScience and Remote Sensing**, v. 57, n. 8, p. 1057–1082, 2020. DOI: [10.1080/15481603.2020.1843846](https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1843846).

KURITA, Naoyuki. 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. DOI: [10.1002/jgrd.50754](https://doi.org/10.1002/jgrd.50754).

KURITA, N.; ICHIYANAGI, K.; MATSUMOTO, J.; YAMANAKA, M. D.; OHATA, T. 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. DOI: [10.1016/j.gexplo.2009.03.002](https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2009.03.002).

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 δD observations. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 481, p. 387-394, 2018. DOI: [10.1016/j.epsl.2017.10.048](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.10.048).

LEE, J.; FUNG, I. “ Amount effect ” of water isotopes and quantitative analysis of post-condensation processes. **Hydrological Processes**, v. 8, p. 1-8, 2008. DOI: [10.1002/hyp.6637](https://doi.org/10.1002/hyp.6637).

LEKSHMY, P. R.; MIDHUN, M.; RAMESH, R. Influence of stratiform clouds on δD and $\delta^{18}O$ of monsoon water vapour and rain at two tropical coastal stations. **Journal of Hydrology**, v. 563, 354-362, 2018. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2018.06.001](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.001).

LEKSHMY, P. R.; MIDHUN, M.; RAMESH, R.; JANI, R. A. ^{18}O depletion in monsoon rain relates to large scale organized convection rather than the amount of rainfall. **Scientific Reports**, v. 4, p. 1-5, 2014. DOI: [10.1038/srep05661](https://doi.org/10.1038/srep05661).

LENTERS, J. D.; COOK, K. H. Simulation and Diagnosis of the Regional Summertime Precipitation Climatology of South America. **Journal of Climate**, v. 8, 2988-3005, 1995.

LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; PABLO, J.; FERNÁNDEZ, R. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in Southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 101, 121-135, 2010. DOI: [10.1007/s00704-009-0207-9](https://doi.org/10.1007/s00704-009-0207-9).

LIU, Q.; LI, Y.; YU, M.; CHIU, L. S.; HAO, X.; DUFFY, D. Q.; YANG, C. Daytime rainy cloud detection and convective precipitation delineation based on a deep neural network method using GOES-16 ABI images. **Remote Sensing**, v. 11, n. 21, p. 1-18, 2019. DOI: [10.3390/rs11212555](https://doi.org/10.3390/rs11212555).

MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B. Structural Characteristics and Radiative Properties of Tropical Cloud Clusters. **Monthly Weather Review**, v. 121, 3234-3260, 1993.

MACHADO, L. A. T.; ROSSOW, W. B.; GUEDES, R. L.; WALKER, A. W. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. **Monthly Weather Review**, v. 126, n. 6, p. 1630-1654, 1998. DOI: [10.1175/1520-0493\(1998\)126<1630:LCVOMC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<1630:LCVOMC>2.0.CO;2).

MACHADO, L. A. T. et al. The CHUVA project: How does convection vary across Brazil? **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 9, p. 1365-1380, 2014. DOI: [10.1175/BAMS-D-13-00084.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00084.1).

MANAGAVE, S. R.; JANI, R. A.; NARAYANA RAO, T.; SUNILKUMAR, K.; SATHEESHKUMAR, S.; RAMESH, R. Intra-event isotope and raindrop size data of tropical rain reveal effects concealed by event averaged data. **Climate Dynamics**, v. 47, n. 3-4, p. 981-987, 2016. DOI: [10.1007/s00382-015-2884-7](https://doi.org/10.1007/s00382-015-2884-7).

MAPES, B. E; HOUZE, R. A. JR. Cloud clusters and superclusters over the oceanic warm pool. **Monthly Weather Review**, v. 121, 1398-1416, 1993.

MARENGO, J. A. Global to National – Regional Assessments of Extremes in South America and Risk of Natural Disasters in Brazil. **IPCC Workshop on Regional Climate Projections and their Use in Impacts and Risk Analysis Studies**, p. 2466, 2021. DOI: [10.1007/s00382-014-2466-0](https://doi.org/10.1007/s00382-014-2466-0).IPCC.

MARENGO, J. A.; SOARES, W. R.; SAULO, C.; NICOLINI, M. Climatology of the low-level jet east of the Andes as derived from the NCEP-NCAR reanalyses: Characteristics and temporal variability. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, 2261-2280, 2004. DOI: [10.1175/1520-0442\(2004\)017<2261:COTLJE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2261:COTLJE>2.0.CO;2).

MARSHALL, J. S. & PALMER, McK. The distribution of raindrops with size. **Journal of Meteorology**, v. 5, p. 165-167, 1948.

MASSMANN, A. K.; MINDER, J. R.; GARREAUD, R. D.; KINGSMILL, D. E.; VALENZUELA, R. A.; MONTECINOS, A.; FULTS, S. L.; SNIDER, J. R. The Chilean Coastal Orographic Precipitation Experiment: Observing the influence of microphysical rain regimes on coastal orographic precipitation. **Journal of Hydrometeorology**, v. 18, n. 10, p. 2723-2743, 2017. DOI: [10.1175/JHM-D-17-0005.1](https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0005.1).

MEHTA, S.; MEHTA, S. K.; SINGH, S.; MITRA, A.; GHOSH, S. K.; RAHA, S. Characteristics of the Z-R Relationships Observed Using Micro Rain Radar (MRR-2) over Darjeeling (27.05° N, 88.26° E): A Complex Terrain Region in the Eastern Himalayas. **Pure and Applied Geophysics**, v. 177, n. 9, p. 4521-4534, 2020. DOI: [10.1007/s00024-020-02472-6](https://doi.org/10.1007/s00024-020-02472-6).

MERLIVAT, L.; JOUZEL, J. Global Climatic Interpretation of the Deuterium-Oxygen 18 Relationship for Precipitation. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, n. 9, 5029-5033, 1979.

MIYAKE, Y.; MATSUBAYA, O.; NISHIHARA, C. An Isotopic Study on Meteoric Precipitation. **Papers Meteorology and Geophysics**, v. 19, n. 2, p. 243-266, 1968.

MOERMAN, J. W.; COBB, K. M.; ADKINS, J. F.; SODEMANN, H.; CLARK, B.; TUEN, A. A. Diurnal to interannual rainfall $\delta^{18}\text{O}$ variations in northern Borneo driven by regional hydrology. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 369-370, 108-119, 2013. DOI: [10.1016/j.epsl.2013.03.014](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.03.014).

MOOK, W. G. Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and applications. 39: v. 1, UNESCO, Paris, 2000, 280p.

MORALES, R. C. A. Thunderstorm Efficiency Regimes in South America as Observed by STARNET and TRMM. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 21, p. 11428-11451, 2019. DOI: [10.1029/2019JD030950](https://doi.org/10.1029/2019JD030950).

MOREIRA, M. S.; RODRIGUES, M. P.; FERREIRA, C. F.; NIENOV, O. H. Regressão linear simples e múltipla. In: CAPP, Edison; NIENOV, Otto Henrique (org.). **Bioestatística Quantitativa Aplicada**. Rio Grande do Sul. 2020, p. 260.

MULLER, C. L.; BAKER, A.; FAIRCHILD, I.A.; KIDD, C.; BOOMER, I. Intra-Event Trends in Stable Isotopes: Exploring Midlatitude Precipitation Using a Vertically Pointing Micro Rain Radar. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, p. 194-214, 2015. DOI: [10.1175/JHM-D-14-0038.1](https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0038.1).

MUNKSGAARD, N. C.; WURSTER, C. M.; BASS, A.; BIRD, M. I. Extreme short-term stable isotope variability revealed by continuous rainwater analysis. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 23, p. 3630-3634, 2012. DOI: [10.1002/hyp.9505](https://doi.org/10.1002/hyp.9505).

MUNKSGAARD, N. C. et al. Data Descriptor: Daily observations of stable isotope ratios of rainfall in the tropics. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 1-7, 2019. DOI: [10.1038/s41598-019-50973-9](https://doi.org/10.1038/s41598-019-50973-9).

MUNKSGAARD, N. C.; ZWART, C.; HAIG, J.; CERNUSAK, L. A.; BIRD, M. I. Coupled rainfall and water vapour stable isotope time series reveal tropical atmospheric processes on multiple timescales. **Hydrological Processes**, v. 34, n. 1, p. 111-124, 2020. DOI: [10.1002/hyp.13576](https://doi.org/10.1002/hyp.13576).

NARAYANA RAO, T.; KIRANKUMAR, N. V. P.; RADHAKRISHNA, B.; NARAYANA RAO, D. Classification of tropical precipitating systems using wind profiler spectral moments. Part I: Algorithm description and validation. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 25, n.6, p. 884-897, 2008. DOI: [10.1175/2007JTECHA1031.1](https://doi.org/10.1175/2007JTECHA1031.1).

NIETO-FERREIRA, R.; RICKENBACH, T. M.; WRIGHT, E. A. The role of cold fronts in the onset of the monsoon season in the South Atlantic convergence zone. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Q. J. R. Meteorol. Soc, v. 137, p. 908-922, 2011. DOI: [10.1002/qj.810](https://doi.org/10.1002/qj.810).

NZEUKOU, A.; SAUVAGEOT, H. Raindrop Size Distribution and Radar Parameters at Cape Verde. **Journal of Applied Meteorology**, v. 43, p. 90-105, 2004.

PAMPUCH, L. A.; AMBRIZZI, T. Sistemas Frontais Sobre a América Do Sul Parte II: Monitoramento Mensal Em Dados Da Reanálise I Do Ncep/Ncar. **Ciência e Natura**, v. 38, 105, 2016. DOI: [10.5902/2179460x19811](https://doi.org/10.5902/2179460x19811).

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. DOI: [10.5194/hess-11-1633-2007](https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007).

PELLEGRINA, G. J. **Precipitação e Movimentos de Massa: contribuição à Emissão de Alerta nos Municípios de Coimbra - Portugal e Campinas (SP) - Brasil**. 2015. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2015.

PUTMAN, A. L.; FIORELLA, R. P.; BOWEN, G. J.; CAI, Z. A Global Perspective on Local Meteoric Water Lines: Meta-analytic Insight Into Fundamental Controls and Practical Constraints. **Water Resources Research**, v. 55, n. 8, p. 6896-6910, 2019. DOI: [10.1029/2019WR025181](https://doi.org/10.1029/2019WR025181).

R CORE TEAM. **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>, 2022.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. Da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010. DOI: [10.1590/S0102-77862010000200004](https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004).

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. Da. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terrae Didatica**, v. 8, n. 1, p. 34, 2012. DOI: [10.20396/td.v8i1.8637425](https://doi.org/10.20396/td.v8i1.8637425).

RIBEIRO, B. Z.; MACHADO, L. A. T.; BISCARO, T. S.; FREITAS, E. D.; MOZER, K. W.; GOODMAN, S. J. An evaluation of the GOES-16 rapid scan for nowcasting in southeastern Brazil: Analysis of a severe hailstorm case. **Weather and Forecasting**, v. 34, n. 6, p. 1829-1848, 2019. DOI: [10.1175/WAF-D-19-0070.1](https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0070.1).

RINDSBERGER, M.; JAFFE, S.; RAHAMIM, S.; GAT, J. R. Patterns of the isotopic composition of precipitation in time and space: data from the Israeli storm water collection program. **Tellus**, Series B, v. 42 B, n. 3, p. 263-271, 1990. DOI: [10.3402/tellusb.v42i3.15218](https://doi.org/10.3402/tellusb.v42i3.15218).

RISI, C.; BONY, S.; VIMEUX, F.; DESCROIX, L.; IBRAHIM, B.; LEBRETON, E.; MAMADOU, I.; SULTAN, B.; What controls the isotopic composition of the African monsoon precipitation? Insights from event-based precipitation collected during the 2006 AMMA field campaign. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 24, p. 1-6, 2008. DOI: [10.1029/2008GL035920](https://doi.org/10.1029/2008GL035920).

RISI, C.; BONY, S.; VIMEUX, F. Influence of convective processes on the isotopic composition ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of precipitation and water vapor in the tropics: 2. Physical

interpretation of the amount effect. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 113, n. 19, p. 1-12, 2008. DOI: [10.1029/2008JD009943](https://doi.org/10.1029/2008JD009943).

RISI, C.; BONY, S.; VIMEUX, F.; CHONGD, M.; DESCROIXE, L. Evolution of the stable water isotopic composition of the rain sampled along sahelian squall lines. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 136, n. 1, 227-242, 2010a. DOI: [10.1002/qj.485](https://doi.org/10.1002/qj.485).

RISI, C.; BONY, S.; VIMEUX, F.; JOUZEL, J. Water-stable isotopes in the LMDZ4 general circulation model: Model evaluation for present-day and past climates and applications to climatic interpretations of tropical isotopic records. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 115, n. 12, 1-27, 2010b. DOI: [10.1029/2009JD013255](https://doi.org/10.1029/2009JD013255).

ROMATSCHKE, U.; HOUZE, Robert A. Extreme summer convection in South America. **Journal of Climate**, v. 23, n. 14, 3761-3791, 2010. DOI: [10.1175/2010JCLI3465.1](https://doi.org/10.1175/2010JCLI3465.1).

ROMATSCHKE, U.; HOUZE, R. A. JR. Characteristics of precipitating convective systems accounting for the summer rainfall of tropical and subtropical South America. **Journal of Hydrometeorology**, v. 14, n. 1, p. 25-46, 2013. DOI: [10.1175/JHM-D-12-060.1](https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-060.1).

ROZANSKI, K.; SONNTAG, C. Vertical distribution of deuterium in atmospheric water vapour. **Tellus**, v. 34, n. 2, p. 135-141, 1982. DOI: [10.3402/tellusa.v34i2.10795](https://doi.org/10.3402/tellusa.v34i2.10795).

ROZANSKI, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; GONFIANTINI, R. Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. **Climate Change in Continental Isotopic Records**, Monograph 78: 1-36, 1993. DOI: [10.1029/GM078p0001](https://doi.org/10.1029/GM078p0001).

SÁNCHEZ-MURILLO, R. et al. Deciphering key processes controlling rainfall isotopic variability during extreme tropical cyclones. **Nature Communications**, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2019. DOI: [10.1038/s41467-019-12062-3](https://doi.org/10.1038/s41467-019-12062-3).

SANTOS, V.; GASTMANS, D.; SANTAROSA, L. V.; BATISTA, L. V.; BETANCUR, S. B.; OLIVEIRA, M. E. D.; FILHO, A. J. P. Variabilidade da Composição Isotópica da Precipitação na Região Central do Estado de São Paulo. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 33, n. 2, p. 171-181, 2019a.

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. 4, p. 647-660, 2019b. DOI: [10.1002/hyp.13351](https://doi.org/10.1002/hyp.13351).

SATYAMURTY, P.; MATTOS, L. F. Climatological Lower Tropospheric Frontogenesis in the Midlatitudes Due to Horizontal Deformation and Divergence. **Monthly Weather Review**, v. 117, n. 6, 1355-1364, 1989.

SAUVAGEOT, H. **Radar Meteorology**. Norwood, Artech House, 1992, 366p.

SCHMIT, T. J.; GRIFFITH, P.; GUNSHOR, M. M.; DANIELS, J. M.; GOODMAN, S. J.; LEBAIR, W. J. A closer look at the ABI on the goes-r series. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 4, 681-698, 2017. DOI: [10.1175/BAMS-D-15-00230.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00230.1).

SCHUMACHER, C.; HOUZE R. A. JR.; KRAUCUNAS, I. The Tropical Dynamical Response to Latent Heating Estimates Derived from the TRMM Precipitation Radar. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 61, 1341-1358, 2004. DOI: [10.1175/1520-0469\(2004\)061%3C1341:TTDRTL%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061%3C1341:TTDRTL%3E2.0.CO;2).

SCHUMACHER, C.; HOUZE, R. A. JR. Stratiform rain in the tropics as seen by the TRMM precipitation radar. **Journal of Climate**, v. 16, n. 11, p. 1739-1756, 2003. DOI: [10.1175/1520-0442\(2003\)016<1739:SRITTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<1739:SRITTA>2.0.CO;2).

SEABOLD, S.; PERKTOLD, J. Statsmodels: Econometric and Statistical Modeling with Python. **Proceedings of the 9th Python in Science Conference**, n. Scipy, 92-96, 2010. DOI: [10.25080/majora-92bf1922-011](https://doi.org/10.25080/majora-92bf1922-011).

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 53, n. 3-4, 591-611, 1965.

SHORT, D. A.; KOZU, T.; NAKAMURA, K. Rain rate and raindrop size distribution observations in Darwin Australia. **Proc. Open Symp. on Regional Factors in Predicting Radiowave Attenuation due to Rain**, Rio de Janeiro, Brazil, URSl, 34-40, 1990.

SILVA, J. P. R.; REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em Campo Atmosféricos Recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, p. 355-377, 2019. DOI: [10.5380/abclima.v25i0.64101](https://doi.org/10.5380/abclima.v25i0.64101).

SIQUEIRA, J. R.; ROSSOW, W. B.; MACHADO, L. A. T. Características Estruturais dos Sistemas Convectivos associados à propagação meridional da convecção na América do Sul. **INPE ePrint**: v. 2, p. 1-9, 2004.

SIQUEIRA, J. R.; MACHADO, L. A. T. Influence of the frontal systems on the day-to-day convection variability over South America. **Journal of Climate**, v. 17, n. 9, 1754-1766, 2004. DOI: [10.1175/1520-0442\(2004\)017<1754:IOTFSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<1754:IOTFSO>2.0.CO;2).

SMITH, P. L.; DENNIS, A. S. Derivation of an Z-R relationship by computer optimization and its use in measuring daily areal rainfall. In: (**Amer. Meteor. Soc., Org.**) 1975, Houston: Preprints, 16th Radar Meteorology Conf, 461-466, 1975.

SODEMANN, H. **Tropospheric transport of water vapour: Lagrangian and Eulerian perspectives**. 2006, 225p. Thesis (Doctoral of Sciences), Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2006.

SODERBERG, K.; GOOD, S. P.; O'CONNOR, M.; WANG, L.; RYAN, K.; CAYLOR, K. K. Using atmospheric trajectories to model the isotopic composition of rainfall in central Kenya. **Ecosphere**, v. 4, n. 3, p. 1-18, 2013. DOI: [10.1890/ES12-00160.1](https://doi.org/10.1890/ES12-00160.1).

SRIVASTAVA, R.; RAMESH, R.; RAO, T. N. Relationship between stable isotope ratios and drop size distribution in tropical rainfall. **Journal of Atmospheric Chemistry**, v. 69, n. 1, p. 23-31, 2012. DOI: [10.1007/s10874-012-9227-4](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, 2059-2077, 2015. DOI: [10.1175/BAMS-D-14-00110.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1).

STEINER, M.; HOUZE, R. A. JR.; YUTER, S. E. Climatological Characterization of Three-Dimensional Storm Structure from Operational Radar and Rain Gauge Data. **Journal of Applied Meteorology**, v. 34, 1978-2007, 1995.

STEINER, M.; SMITH, J. A. Convective versus stratiform rainfall: An ice-microphysical and kinematic conceptual model. **Atmospheric Research**, v. 47-48, p. 317-326, 1998. DOI: [10.1016/S0169-8095\(97\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(97)00086-0).

STEINKE, E. T. **Climatologia fácil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012, 148p.

STEWART, M. K. Stable isotope fractionation due to evaporation and isotopic exchange of falling waterdrops: Applications to atmospheric processes and evaporation of lakes. **Journal of Geophysical Research**, v. 80, n. 9, p. 1133-1146, 1975. DOI: [10.1029/JC080i009p01133](https://doi.org/10.1029/JC080i009p01133).

SUN, C.; SHANAHAN, T. M.; PARTIN, J. Controls on the Isotopic Composition of Precipitation in the South-Central United States. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 14, p. 8320-8335, 2019. DOI: [10.1029/2018JD029306](https://doi.org/10.1029/2018JD029306).

TAIYUN, W.; VILIAM, S. **R package "corrplot"**, 2017. Disponível em: <https://github.com/taiyun/corrplot>. Acesso em 23 de dezembro de 2021.

TAVARES, A. C.; 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.

TENÓRIO, S. R.; B. H. KWON, M. C. S.; LEE, G. Tropical Rainfall Characteristic at the Eastern Coast of South America. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 46, 415-423, 2010.

TORRI, G.; MA, D.; KUANG, Z. Stable water isotopes and large-scale vertical motions in the tropics. **Journal of Geophysical Research**, v. 122, n. 7, p. 3703-3717, 2017. DOI: [10.1002/2016JD026154](https://doi.org/10.1002/2016JD026154).

UREY, H. C. The thermodynamic properties of isotopic substances. **Journal of the Chemical Society**, n. 582, 562, 1947. DOI: [10.1039/jr9470000562](https://doi.org/10.1039/jr9470000562).

VERA, C. et al. The South American low-level jet experiment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 87, n. 1, 63-77, 2006. DOI: [10.1175/BAMS-87-1-63](https://doi.org/10.1175/BAMS-87-1-63).

VIMEUX, F.; TREMOY, G.; RISI, C.; GALLAIRE, R. A strong control of the South American SeeSaw on the intra-seasonal variability of the isotopic composition of precipitation in the Bolivian Andes. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 307, n. 1-2, p. 47-58, 2011. DOI: [10.1016/j.epsl.2011.04.031](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.04.031).

VIRTANEN, P. et al. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. **Nature Methods**, v. 17, n. 3, 261-272, 2020. DOI: [10.1038/s41592-019-0686-2](https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2).

WANG, S.; ZHANG, M.; CHE, Y.; ZHU, X.; LIU, X. Influence of below-cloud evaporation on deuterium excess in precipitation of arid Central Asia and its meteorological controls. **Journal of Hydrometeorology**, v. 17, n. 7, 1973-1984, 2016. DOI: [10.1175/JHM-D-15-0203.1](https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0203.1).

WASSENAAR, L. I.; COPLEN, T. B.; AGGARWAL, P. K. Approaches for Achieving Long-Term Accuracy and Precision of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ for Waters Analyzed using Laser Absorption Spectrometers. **Environmental Science & Technology**, v. 48, 1123-1131, 2014. DOI: [10.1021/es403354n](https://doi.org/10.1021/es403354n).

WHITE, A. B.; GOTTAS, D. J.; STREM, E. T.; RALPH, F. M.; NEIMAN, P. J. An automated brightband height detection algorithm for use with Doppler radar spectral moments. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 5, 687-697, 2002. DOI: [10.1175/1520-0426\(2002\)019<0687:AABHDA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0687:AABHDA>2.0.CO;2).

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. New York, Springer-Verlag, 2016.

WILLIAMS, M.; HOUZE R. A. JR. Satellite-observed characteristics of winter monsoon cloud clusters. **Monthly Weather Review**, v. 115, 505-519, 1987. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115,0505:SOCOWM.2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115,0505:SOCOWM.2.0.CO;2).

XI, X. A Review of Water Isotopes in Atmospheric General Circulation Models: Recent Advances and Future Prospects. **International Journal of Atmospheric Sciences**, v. 2014, n. 1, 1-16, 2014. DOI: [10.1155/2014/250920](https://doi.org/10.1155/2014/250920).

XU, T. et al. Stable isotope ratios of typhoon rains in Fuzhou, Southeast China, during 2013-2017. **Journal of Hydrology**, v. 570, 445-453, 2019. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2019.01.017](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.017).

YOSHIMURA, K. Stable water isotopes in climatology, meteorology, and hydrology: A review. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 93, n. 5, p. 513-533, 2015. DOI: [10.2151/jmsj.2015-036](https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-036).

ZAR, J. H. **Biostatistical Analysis**. Fifth Edit ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson, 2010, 945p. DOI: [10.1080/00927879008823943](https://doi.org/10.1080/00927879008823943).

ZHANG, A.; FU, Y. Life cycle effects on the vertical structure of precipitation in East China measured by Himawari-8 and GPM DPR. **Monthly Weather Review**, v. 146, n. 7, 2183-2199, 2018. DOI: [10.1175/MWR-D-18-0085.1](https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0085.1).

ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M. V.; LINTNER, B. R. The poleward shift of South Atlantic Convergence Zone in recent decades. **Climate Dynamics**, v. 52, n. 5-6, p. 2545-2563, 2019. DOI: [10.1007/s00382-018-4277-1](https://doi.org/10.1007/s00382-018-4277-1).

ZWART, C.; MUNKSGAARD, N. C.; LAMBRINIDIS, D.; BIRD, M. I.; PROTAT, A.; KURITA, N. The isotopic signature of monsoon conditions, cloud modes, and rainfall type. **Hydrological Processes**, 2296-2303, 2018. DOI: [10.1002/hyp.13140](https://doi.org/10.1002/hyp.13140).