

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Instituto de Geociências

**RELAÇÃO DA DINÂMICA AMBIENTAL COM A GEOQUÍMICA DE CAVERNAS BEM
VENTILADAS DO BRASIL CENTRAL**

TF 23/66

Aluna: Vanessa Faria Bohrer

Orientador: Prof. Nicolás Misailidis Strikis

Coorientador: Prof. Francisco Willian da Cruz Júnior

São Paulo

Dezembro de 2023

AGRADECIMENTOS

É de fato uma grande vitória chegar até aqui, me formar como geóloga na Universidade de São Paulo. E eu devo agradecer a muitas pessoas por essa conquista.

Em primeiro lugar a minha família. A minha mãe, por todo o esforço e dedicação em criar duas filhas sozinhas e sempre nos dar o melhor, sempre me apoiou e acreditou em mim. A minha irmã, por toda a amizade, pelo apoio, por sempre me incentivar, vibrar com a geologia comigo, e principalmente por sempre acreditar em mim. E ao meu namorado, um parceiro maravilhoso, que sempre me apoia, incentiva e topa todos os roles e viagens geológicas comigo, já é quase um geólogo de tabela.

Em segundo lugar, agradeço muito ao professor Chico Bill, que no final do 2º ano de graduação, percebeu em mim um interesse pelas pesquisas paleoclimáticas e me convidou para desenvolver um trabalho de iniciação científica. Esse fato, para mim, foi extremamente importante, o incentivo que eu precisava para seguir apaixonada pela Geologia, num momento tão delicado que foi a pandemia.

Também agradeço imensamente ao meu orientador Nicolás, por toda a orientação, paciência e todo o conhecimento transmitido de uma forma tão acessível. Eu sou extremamente grata por tê-lo como orientador.

Agradeço também ao Evandro, que nesse ano de trabalho de formatura foi um grande presente poder trabalharmos juntos, pois me auxiliou em alguns momentos e possibilitou a realização do campo ao Peruacu, no piloto da nave do Chewbacca. Nesse campo também, dedico um agradecimento especial ao Luciano, que nos acompanhou, guiou e ajudou nas tarefas com tanta parceria.

Além disso, agradeço a todo o pessoal do laboratório de sistemas cársticos do IGc-USP, a Verônica, Gisele, Julio, Marcela, Plácido, Natália, Vinicius, Matheus e todos os demais que estiveram presentes de alguma forma durante minha iniciação científica e trabalho de formatura.

Outros diferenciais marcantes na minha trajetória pela graduação foi a passagem como presidente do CEPEGE e posteriormente presidente da ENEGE. É até difícil de descrever a importância dessas entidades na minha vida. Elas fizeram que eu descobrisse em mim características que não conhecia, a principal delas foi a liderança e a confiança em fazer as coisas acontecerem, mesmo que sozinha, além de entender melhor o significado do coletivo, e do meu papel político na Geologia. A minha vida não é mais a mesma depois de passar pelo CEPEGE e ENEGE. Também sou extremamente grata pelas amizades que essas entidades me proporcionaram.

Durante os anos de graduação muitas coisas aconteceram, alguns laços de amizades foram feitos, outros desfeitos e outros se fortificaram, e a esses eu tenho muito a

agradecer, por todo o apoio nessa caminhada, que às vezes pode ser muito difícil e um grande teste de resistência e resiliência. Potranka, Xupiscu, Tigrão, Bauducco, Dilma, Hamde, Levi e Porteira, sem vocês essa caminhada seria muito mais difícil. Eu amo muito vocês e obrigada por tudo, vocês sabem o quanto são especiais.

“Ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua própria produção ou a sua construção.” Paulo Freire

ÍNDICE

RESUMO	5
ABSTRACT	6
1. INTRODUÇÃO	7
2. METAS E OBJETIVOS	8
3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA PRELIMINAR	9
3.1 Área de estudo	9
4. MATERIAIS E MÉTODOS	13
4.1 Monitoramento hidrogeoquímico e isotópico da Gruta da onça	13
4.2 Amostragem de calcita para análise isotópica e elementar	16
4.3 Análise isotópica de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ em carbonato recente	16
5. Resultados Obtidos	17
5.1 Parâmetros ambientais da Gruta da onça	17
5.2 Taxa de gotejamento	25
5.3 Taxa de deposição de carbonato de cálcio	28
5.3 Isótopos estáveis de carbono e oxigênio em carbonato recente	31
5.4 Isótopos estáveis de carbono e oxigênio e os parâmetros ambientais	34
6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	36
6.1 Efeitos controladores da variabilidade isotópica na escala sazonal	36
7. CONCLUSÃO	39
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

RESUMO

Na região Brasil central, o aumento da evapotranspiração potencial decorrente das elevadas temperaturas e o forte caráter sazonal do regime hidrológico amplia os riscos de seca, levantando preocupações sobre a vulnerabilidade dos ecossistemas associados. Portanto, é de fundamental importância ampliar os dados observacionais do clima para compreender como as variações climáticas relacionadas ao aumento da temperatura média global, devido às emissões de gases de efeito estufa, podem afetar o clima e a disponibilidade hídrica de uma região.

Resultados inéditos de pesquisas em algumas cavernas bem ventiladas do Brasil central, desenvolvidos pelo grupo de pesquisa paleoclimáticas do IGc-USP, indicam que nesses ambientes as variações da umidade relativa e consequentemente da evaporação potencial, induzem fortes efeitos sobre o ciclo hidrológico que são detectadas pelas razões de isótopos de oxigênio e carbono.

Esse projeto se propôs em continuar o monitoramento geoquímico de cavernas bem ventiladas na região do Brasil central com a finalidade de determinar a influência de parâmetros ambientais de temperatura, umidade relativa e precipitação, sobre a isotopia de C e O impressas nos espeleotemas de cavernas com sistema aberto no Brasil Central. Para isso foi selecionada a caverna Lapa da Onça, localizada na região norte de Minas Gerais.

A pesquisa demonstrou que a taxa de deposição de CaCO_3 não depende somente da disponibilidade hídrica no aquífero, mas também das condições ambientais, apresentando boa relação em fases com a temperatura. Além disso, os parâmetros ambientais de temperatura e umidade relativa também mostram influenciar diretamente o comportamento isotópico de C e O impressas em espeleotemas, sendo a influência da temperatura sobre os valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ mais evidente, e a umidade relativa mais influente nos valores de $\delta^{18}\text{O}$. Os parâmetros indicam um ciclo sazonal bem marcado, relacionado com as estações do ano e padrões de alta temperatura e umidade relativa.

ABSTRACT

In the central Brazil region, the increase in potential evapotranspiration resulting from high temperatures and the strong seasonal nature of the hydrological regime increases the risks of drought, raising concerns about the vulnerability of associated ecosystems. Therefore, it is of fundamental importance to expand observational climate data to understand how climate variations related to the increase in the global average temperature, due to greenhouse gas emissions, can affect the climate and water availability of a region.

Unprecedented research results in some well-ventilated caves in central Brazil, developed by the paleoclimatic research group at IGc-USP, indicate that in these environments variations in relative humidity and consequently potential evaporation, induce strong effects on the hydrological cycle that are detected by oxygen and carbon isotope ratios.

This project proposed to continue the geochemical monitoring of well-ventilated caves in the region of central Brazil with the purpose of determining the influence of environmental parameters of temperature, relative humidity and precipitation, on the isotopy of C and O printed in the speleothems of caves with a system opened in Central Brazil. For this purpose, the Lapa da Onça cave was selected, located in the northern region of Minas Gerais.

The research demonstrated that the rate of CaCO₃ deposition does not only depend on water availability in the aquifer, but also on environmental conditions, showing a good relation in phases with temperature. Furthermore, the environmental parameters of temperature and relative humidity are also shown to directly influence the isotopic behavior of C and O printed in speleothems, with the influence of temperature on the isotopic values of $\delta^{13}\text{C}$ being more evident, and the relative humidity being more influential on the values of $\delta^{18}\text{O}$. The parameters indicate a well-marked seasonal cycle, related to the seasons and patterns of high temperature and relative humidity.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente os espeleotemas são considerados pela comunidade científica como um dos registros paleoclimáticos mais precisos em termos de cronologia, capazes de fornecer registros de alta resolução temporal chegando à escala anual e sub-anual. Além disso, as variações na composição química ou assinatura isotópica dos espeleotemas, de modo geral, são sensíveis às oscilações de parâmetros climáticos e ambientais, como temperatura média anual, pluviosidade e umidade a depender da região geográfica onde a caverna está situada (Fairchild *et al.*, 2006).

Para o avanço nas pesquisas paleoclimáticas com base em análises isotópicas de espeleotemas, são necessários a ampliação da distribuição geográfica dos registros e dos estudos de monitoramento para acrescer a capacidade de relacionar os aspectos climáticos da dinâmica ambiental com as variações geoquímicas e isotópicas do sistema cárstico. Tais estudos são fundamentais para estabelecer com precisão a relação entre os componentes isotópicos e hidrogeoquímicos de sistemas cársticos com os fatores climáticos e ambientais, expressos pela variação de pluviosidade, temperatura, umidade relativa e circulação atmosférica no interior das cavernas (Karmann *et al.*, 2007; Mouquet *et al.*, 2016). Pretende-se com essa pesquisa aumentar a confiabilidade das interpretações paleoclimáticas e paleoambientais através dos estudos de espeleotemas.

A falta de estudos que relacionem as mudanças ambientais com as variações em parâmetros como isótopos estáveis, elementos traços, matéria orgânica, entre outros indicadores paleoambientais que conseguem ser registrados em espeleotemas, também representam atualmente uma limitação da comunidade científica na interpretação dos registros paleoclimáticos em espeleotemas. Apesar dos avanços nos estudos paleoclimáticos pelo mundo, ainda são escassos os estudos que relacionam a dinâmica atual em áreas cársticas, com isótopos estáveis (Mickler *et al.*, 2004; Perrin, 2003) ou hidroquímica de gotejamentos (Cruz *et al.*, 2005, Karmann *et al.*, 2007). Esse é um fator de relevante consideração porque os mecanismos de respostas climáticas são estritamente dependentes das condições ambientais locais, o que aponta a necessidade de novos monitoramentos de forma a evitar interpretações paleoclimáticas ambíguas ou errôneas (Fairchild *et al.*, 2006).

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal compreender a influência das variações sazonais de temperatura e umidade relativa sobre a composição isotópica de oxigênio e carbono de espeleotemas de cavernas bem ventiladas do Brasil Central.

Tem como objetivos específicos:

1. Identificar os principais controladores da taxa de deposição de carbonato nas stalagmites a partir da análise das variações mensais de formação de carbonato em substratos artificiais de deposição;
2. Avaliar o efeito das variações de temperatura e umidade relativa sobre a composição de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ de stalagmites.

3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA PRELIMINAR

3.1 Área de estudo

A área de estudo está inserida no contexto do Cráton São Francisco, que foi estabilizado no final do ciclo Transamazônico (entre 2,1 e 1,8 Ga) e é limitado pelas faixas de dobramento brasilianas Brasília, Rio Preto, Riacho do Pontal, Sergipana e Araçuaí (Almeida, 1977). Na região de estudo a sequência litológica é representada na base por rochas de idade proterozoica do embasamento cristalino (Complexo Paramirim), composta por rochas granito-gnáissicas, acima deposições de sequências supracrustais de idade neoproterozoica (Formações Januária na base e Nhandutiba no topo) que constituem as formações carbonáticas e argilosas do Grupo Bambuí. Sobrepostas a estas estão os arenitos silicificados da Formação Urucuia (Cretáceo), e por último, no topo, estão os colúvios e alúvios relacionados à evolução do atual relevo.

A diagênese dos calcários e dolomitos, possivelmente ocorreram em ambientes de águas rasas e mar calmo, sendo a regressão marinha responsável pela sedimentação pelítica observada pelo aumento gradual de argila e pela alternância entre bancos de dolomito e siltito (Dardenne, 1978; Rabello *et al.*, 1977). Quanto à sedimentação dos arenitos, segundo Pflug & Renger (1973), é provável que tenha ocorrido em ambiente desértico, com predominância de processos eólicos e flúvio-eólicos. O projeto RADAMBRASIL (1982) também menciona a formação de concreções ferruginosas e depósitos detritico-lateríticos no topo da Formação Urucuia, após a deposição e diagênese dos arenitos.

A região da bacia do rio Peruaçu apresenta baixo grau de deformação e metamorfismo incipiente (RADAMBRASIL, 1982), o acamamento sedimentar das sequências carbonáticas no médio-baixo curso do rio se apresenta sub-horizontal, com leve caimento para a direção sudeste e bem preservado (Piló, 1997). Há nas sequências pelito-carbonáticas estruturas subverticalizadas (fraturas) com direções que correspondem aproximadamente às direções regionais predominantes no Cráton (NNE-SSW e NNW-SSE), segundo Piló (1997) são consequência de leves deformações tectônicas entre o fim do Proterozóico e o Pré Cambriano.

Geograficamente, a região de estudo está situada no Norte de Minas Gerais, entre os Municípios de Januária, Itacarambi e São João das Missões, mais especificamente dentro do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu - PNCP ($14^{\circ}54'$ e $15^{\circ}15'$ S / $44^{\circ}03'$ e $44^{\circ}22'$ W), que conta com quase 56.800 ha. A Figura 1 traz a localização da área em relação às unidades carbonáticas do Brasil, a localização dos Municípios onde se situa o parque, e a localização do parque em relação a bacia hidrográfica do rio Peruaçu.

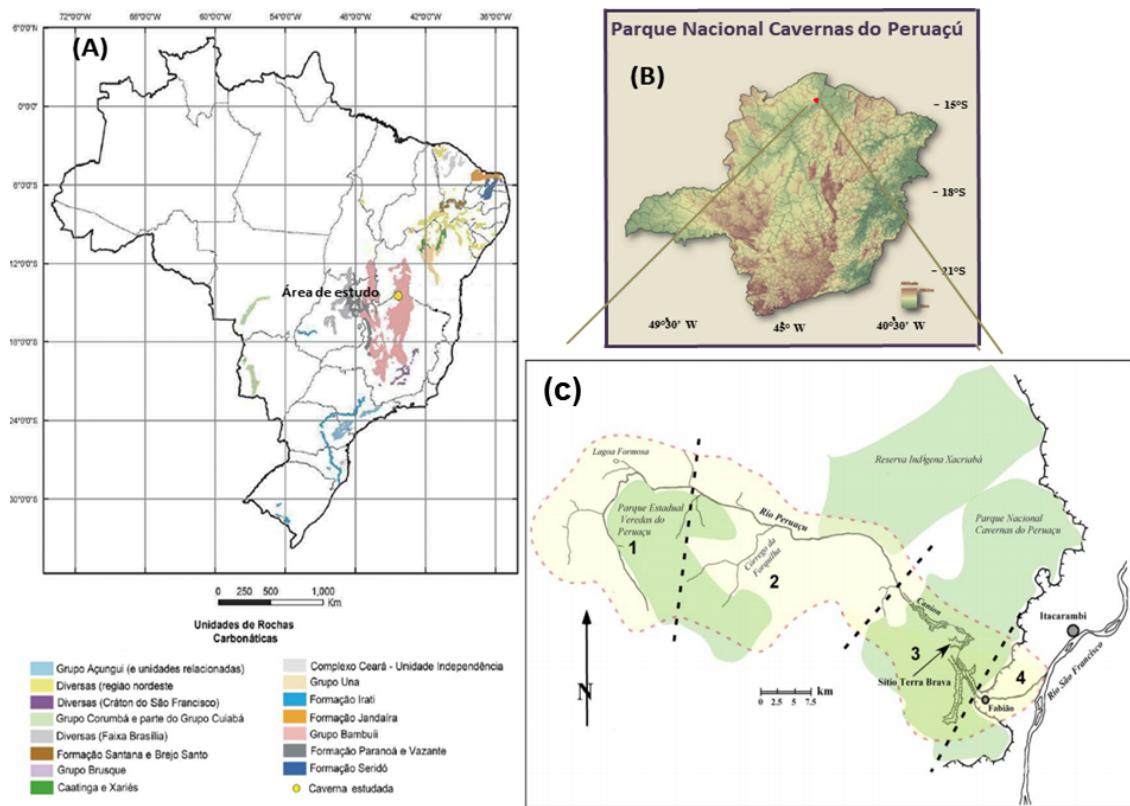


Figura 1: (A) Localização da área de estudo e as formações carbonáticas do Brasil. (B) Localização dos Municípios de Januária e Itacarambi no Estado de Minas Gerais. (C) Mapa da bacia do rio Peruaçu (representada pela linha rosa tracejada) com quatro compartimentos geomorfológicos, onde está inserido o Parque Nacional Cavernas do Peruaçu. As linhas pretas tracejadas indicam a separação dos compartimentos em (1) alto vale, (2) zona de transição, (3) compartimento do cânion e (4) planície aluvial. As regiões em verde representam as regiões com vegetação mais adensada. Fonte: (Albuquerque 2019).

Biologicamente a região compõe um ecótono, área de transição entre os biomas do Cerrado e Caatinga (ICMBIO, 2005), esses biomas são atravessados pelo Rio Peruaçu, que nasce dentro do Parque Nacional das Cavernas do Peruaçu e deságua no Rio São Francisco, junto à Depressão São Franciscana em Itacarambi/MG.

Esse sistema cárstico está situado entre as cotas de 560m e 730m, como observa-se no mapa hipsométrico da Figura 3, nesse trecho o rio Peruaçu conta com aproximadamente 17 km de extensão inteiramente encaixado, o seu percurso é interrompido em diversos pontos por sumidouros e ressurgências. A região do parque alvo deste projeto, abrange aproximadamente 5 km de extensão entre as grutas Carlúcio e Troncos (Figura 2), com as cotas altimétricas em média de 650m, desníveis de até 75m e escarpas que variam entre 730m e 760m (Figura 3).

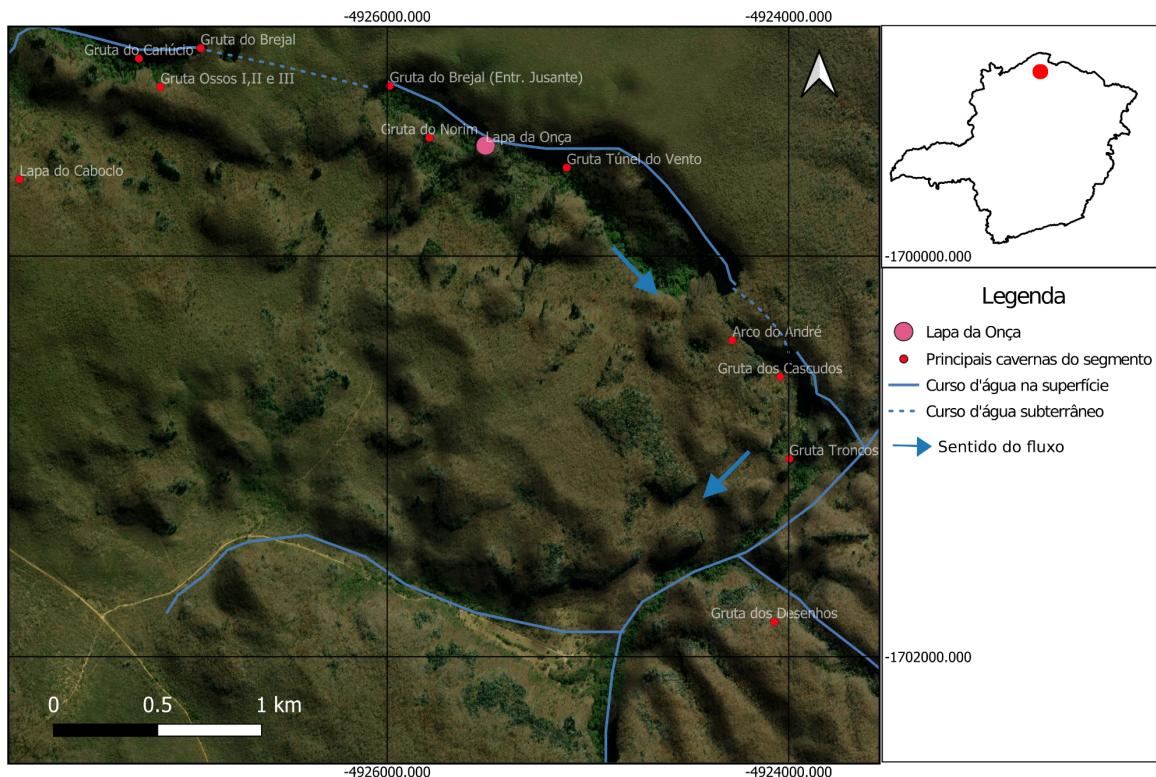


Figura 2: Vista em planta baixa da área de estudo, cânion cárstico do Rio Peruacu. Em destaque, os pontos vermelhos são as principais cavernas, em rosa a caverna do estudo em questão, as linhas azuis representam o curso d'água, o tracejado em azul representa o curso d'água na parte subterrânea, e as setas azuis representam o sentido do fluxo do curso d'água. (Elaboração própria. Dados: Google Satélite; USGS)

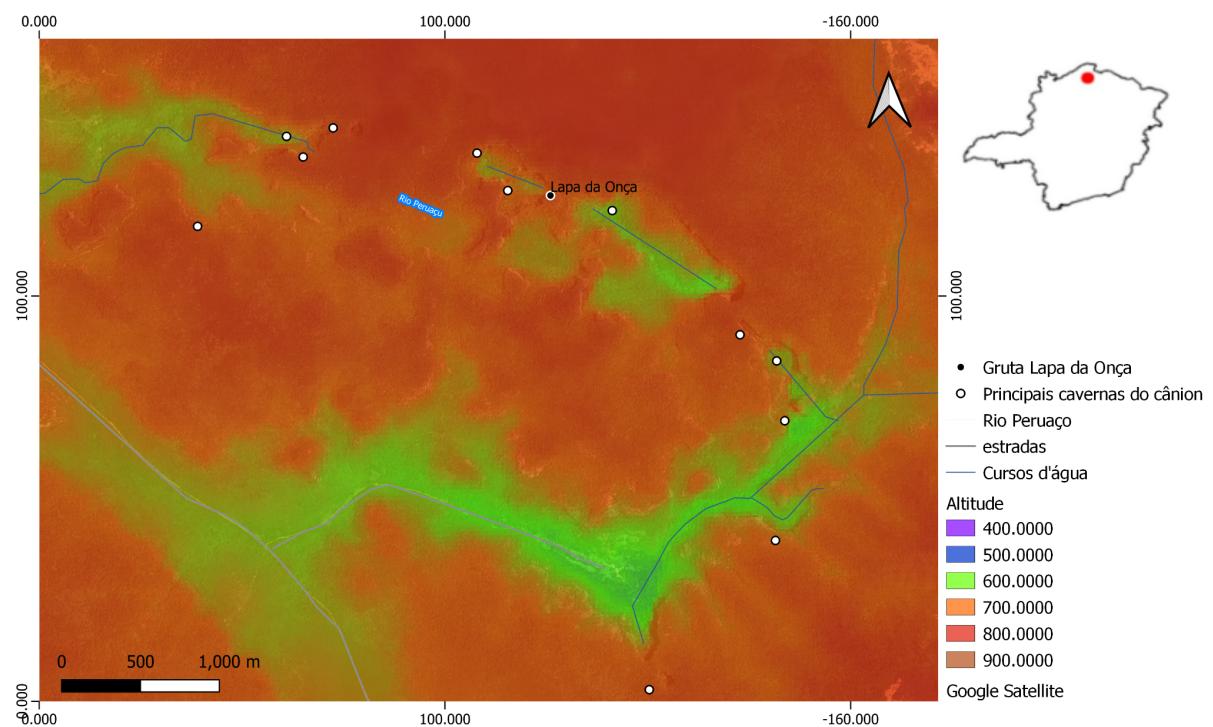


Figura 3: Mapa hipsométrico do cânion cárstico do Rio Peruacu. Com destaque para a caverna “Lapa da Onça”.

Outro importante aspecto da região de estudo é o padrão de precipitação, caracterizado pelos sistemas tropicais associados ao Sistema de Monção da América do Sul (SMAS). A convecção desse sistema é alimentada principalmente pela umidade que vem da Bacia Amazônica (Rao *et al.*, 1996; Vera 2006; Marengo *et al.* 2012). Praticamente toda a precipitação que ocorre na região está associada às atividades convectivas da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), o que imprime um forte componente sazonal à hidrologia da região. A estação chuvosa ocorre entre os meses de outubro a abril, quando é registrado cerca de 95 % da precipitação anual (Stríkis, 2015)

O clima da região é Aw - tropical com estação seca, segundo a classificação climática de Koppen (Koppen; Geiger, 1928). O período mais chuvoso corresponde também ao período mais quente do ano, entre os meses de novembro e abril, enquanto o período de estiagem ocorre entre maio e outubro, sendo o trimestre de junho a agosto o mais seco (Moura, 2009). Quanto à temperatura, a média anual é em torno de 24°C, com mínimas de 16°C e máximas de 34°C.

Segundo (Stríkis, 2021), as regiões Centro-leste e nordeste exibem uma tendência sistemática de redução de precipitação, com início em meados da década de 80. De modo geral, a variabilidade interanual da precipitação nas regiões do Médio e Baixo São Francisco são consistentes, assim como a tendência de seca que se acentua a partir dos anos 2000 (Figura 3b). Sendo assim, no que tange a representatividade da área de estudo, a consciência no regime de precipitação ao longo da bacia hidrográfica reforça a importância dos estudos paleoclimáticos.

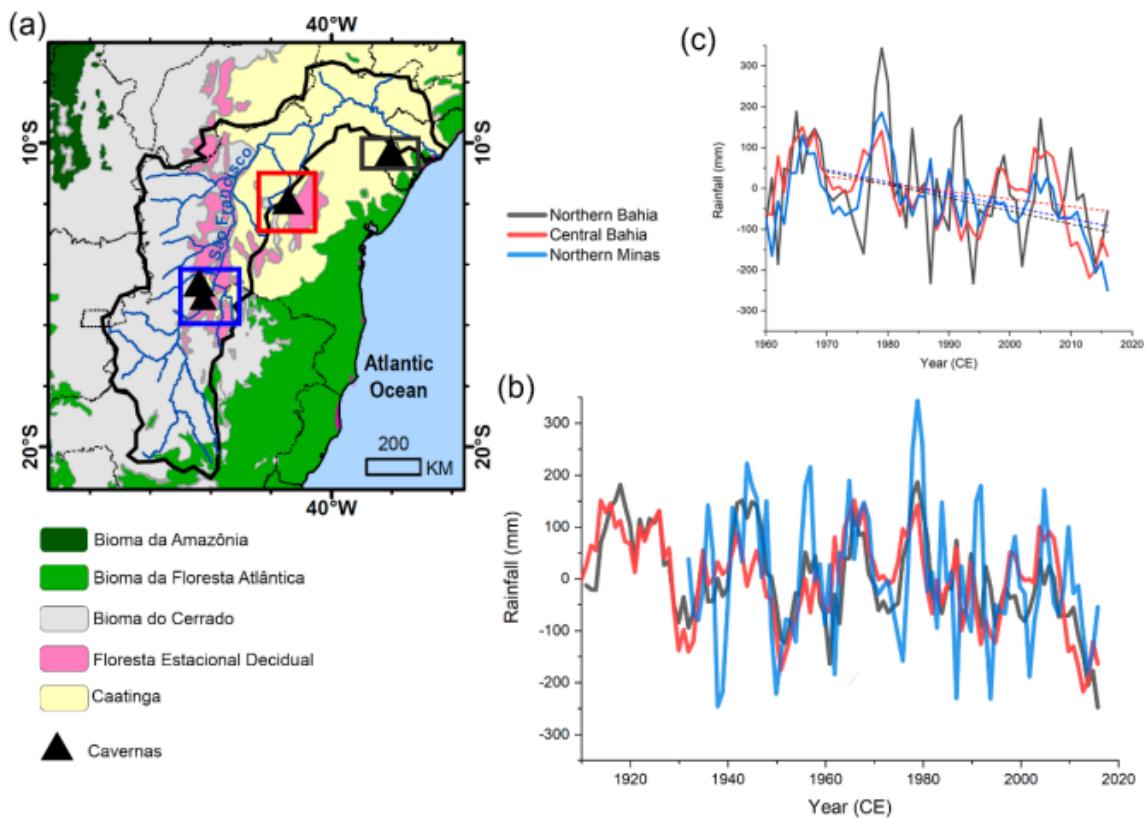


Figura 4: Localização da área de estudo no contexto dos biomas Brasileiros e contexto climático. a) mapa de biomas da região centro-leste com identificação da área de Mata Estacional Decidual e Caatinga. Os quadrados em vermelho, azul e preto delimitam as áreas de estudo no Norte de Minas (cavernas Lapa dos Anjos e Lapa da Onça), centro Bahia (caverna Lapa Doce) e Norte da Bahia (Gruta Bom Pastor); b) série de precipitação local dos sítios de estudo (1a) obtidas pelo GPCC com grade de 0.5o; c) o mesmo que em “b” com detalhe para a tendência de queda de chuva a partir dos anos de 1970.(Strikis, 2021).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Monitoramento hidrogeoquímico e isotópico da Gruta da onça

O monitoramento hidrológico e isotópico da caverna Gruta da Onça iniciou-se em fevereiro de 2018 e estendeu-se até novembro de 2019, com coletas mensais realizadas durante o trabalho de doutorado de Buarque P.F. (2019). Após a conclusão do trabalho, com os apontamentos preliminares da pesquisa, foi de extrema relevância a continuação do monitoramento, contemplada através de um trabalho de iniciação científica logo no ano seguinte (Bohrer, 2021). No entanto, entre março e dezembro de 2020 não houveram atividades de coleta, devido a pandemia do COVID-19. A partir do início de 2021 as coletas voltaram a ser realizadas, porém em períodos mais espaçados, já em 2022 as coletas voltaram a ocorrer mensalmente, e continuaram vigentes até setembro de 2023, a partir de então espera-se que as coletas sejam realizadas em períodos de 6 meses.

Os parâmetros como pluviosidade, temperatura (superfície e subsuperfície) e umidade relativa do ar (superfície e subsuperfície), são obtidos por meio de registradores automáticos e programáveis (*data loggers*), e são periodicamente descarregados em um computador, tarefa a qual é frequentemente realizada com ajuda de guia local. Já o parâmetro vazão de gotejamentos é obtido através da contagem do intervalo de tempo entre uma gota e outra, tarefa a qual é realizada com um cronômetro durante os trabalhos de campo e as visitas dos guias. O último trabalho de campo para a coleta dos dados foi realizado em setembro de 2023. A Figura 5-A mostra o momento de descarregamento dos dados do *data logger*, a Fig 5-B exibe o gráfico automático do software utilizado (Hobbo) com o resumo dos dados descarregados.

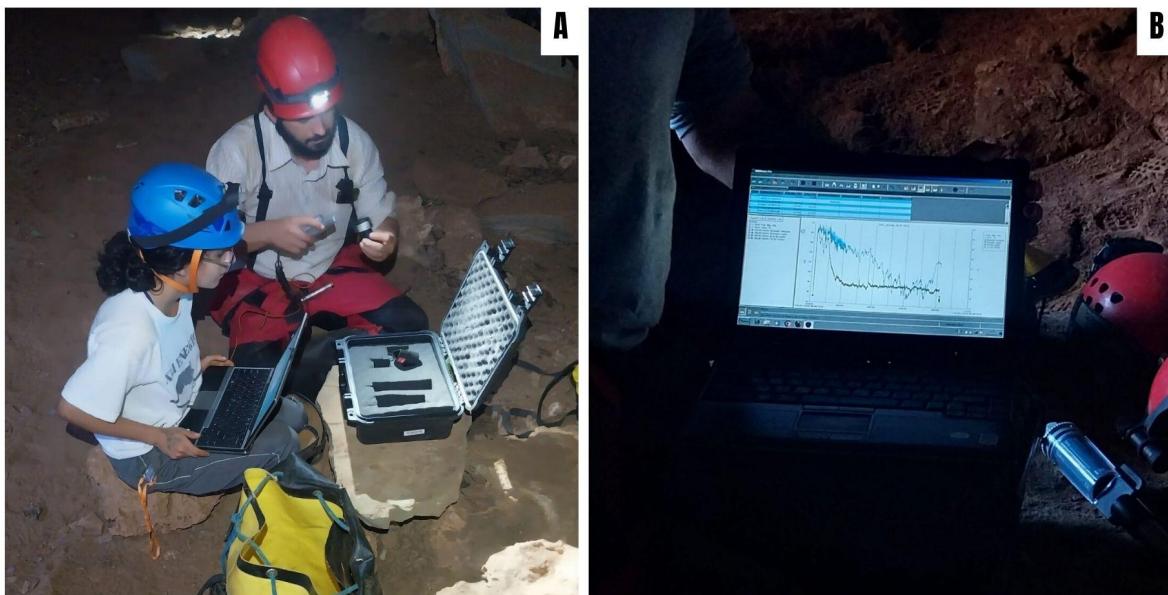


Figura 5: Descarregamento dos dados de pluviosidade, temperatura, umidade relativa do ar, registrado pelos *data loggers* instalados na Lapa da Onça. A) Momento de baixar os dados no computador. B) Gráfico automático dos últimos dados baixados, gerado pelo software (HOBOWarePro v.3.7.22).

No interior da caverna Lapa da Onça foram instalados 5 pontos de monitoramento (Fig. 6), a distribuição espacial dos pontos é apresentada na Figura 7. Cada ponto de monitoramento recebe um substrato artificial de deposição de carbonato, constituído por um vidro de relógio que é trocado mensalmente. Os pontos de monitoramento são identificados por P1, P2, P3, P4 e P5, cada um conta com um critério específico para a instalação, são eles:

- Ponto P1: Ponto mais próximo da entrada da caverna.
- Ponto P2: Ponto localizado no centro do salão principal da caverna.
- Ponto P3: Ponto também localizado no centro do salão principal.
- Ponto P4: Ponto localizado no salão principal com gotejamento ativo.

- Ponto P5: Ponto no interior da cavidade com gotejamento ativo.

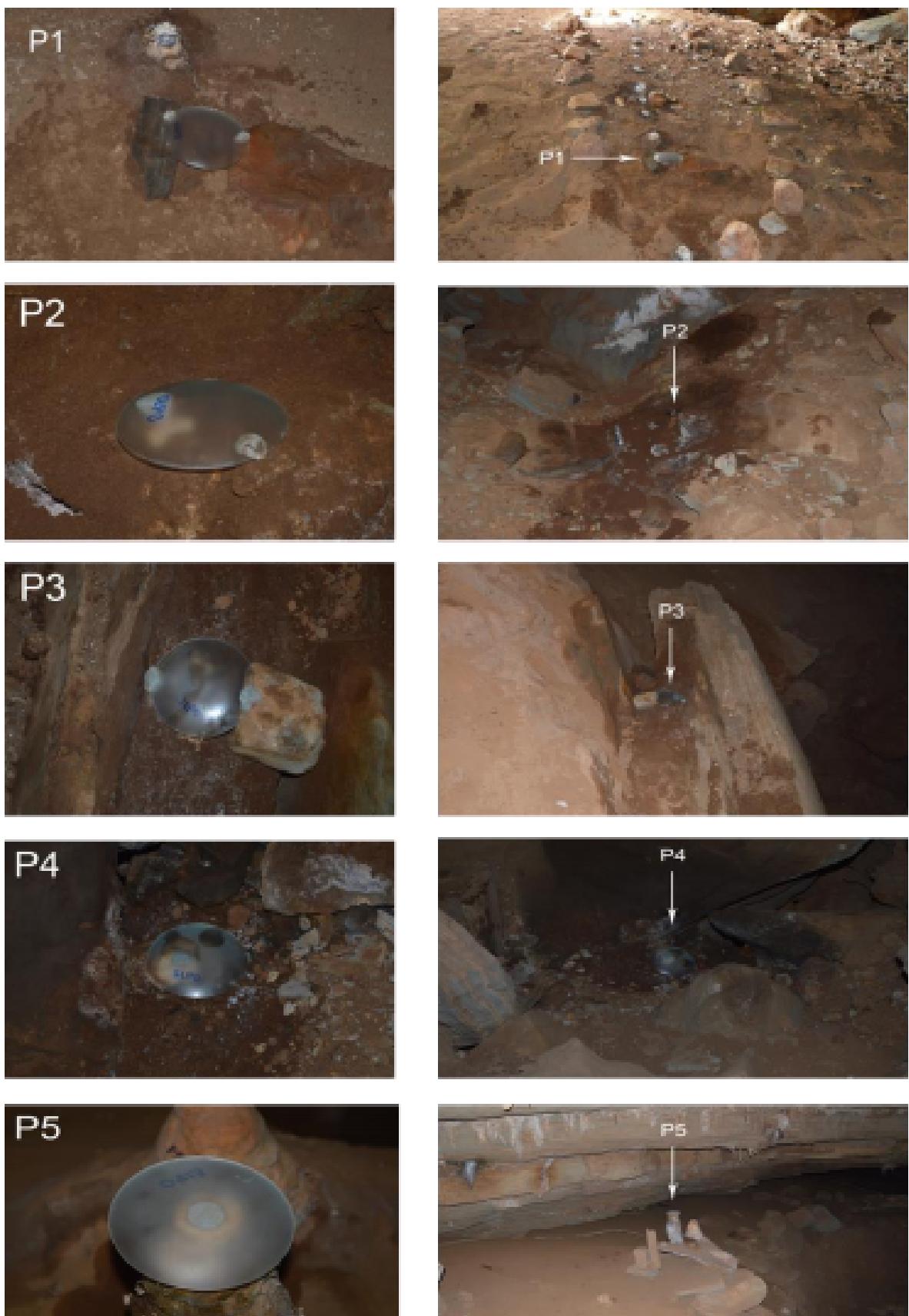


Figura 6: Relação dos pontos de monitoramento hidrogeoquímico instalados na Gruta da Onça.

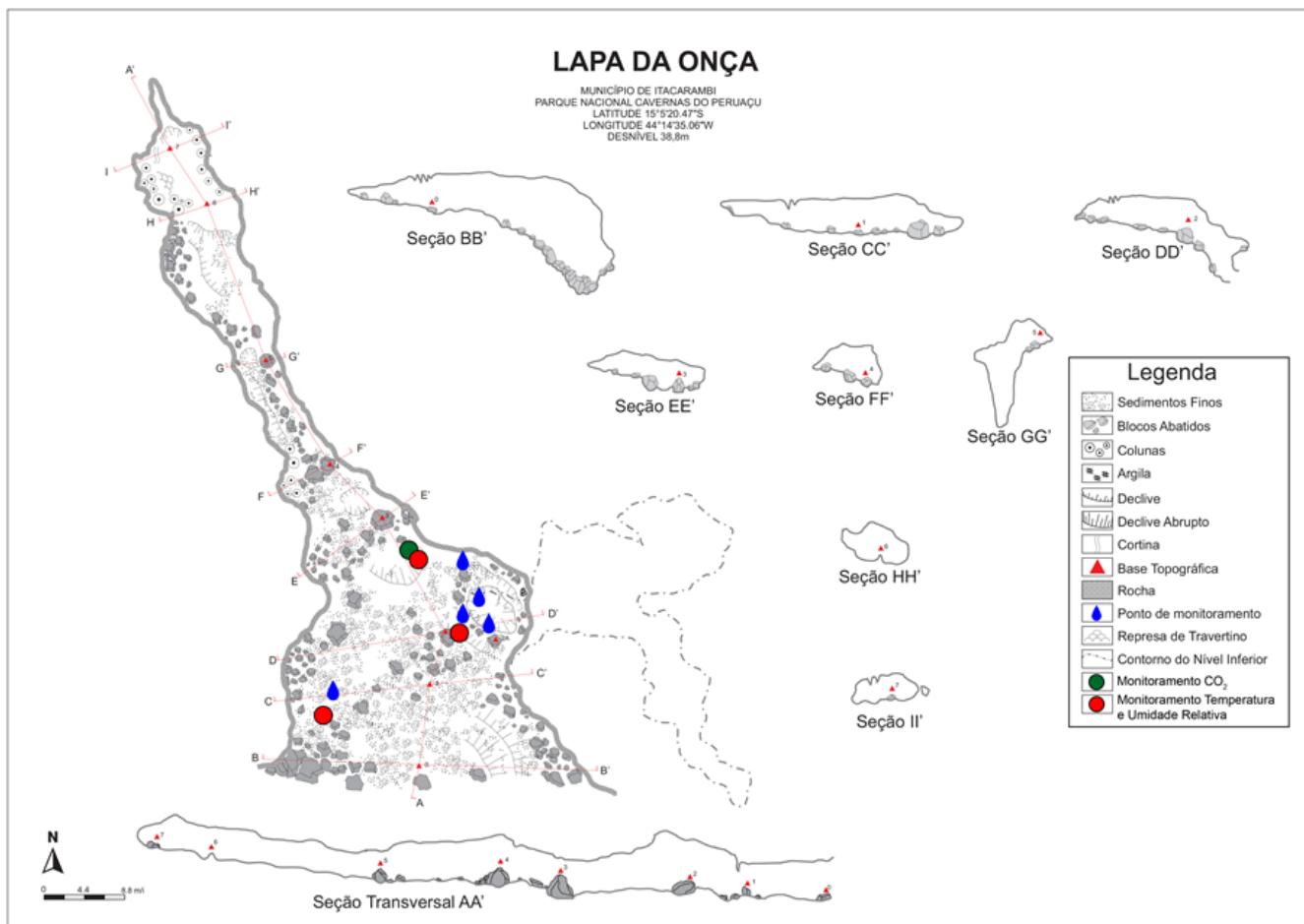


Figura 7: Mapa da Lapa da Onça com a distribuição espacial dos pontos de monitoramento. Fonte: Buarque (2019)

4.2 Amostragem de calcita para análise isotópica e elementar

Os vidros que são instalados na caverna são primeiramente jateados com areia, resultando em uma superfície rugosa que facilite a deposição de calcita. Em seguida os vidros são fixados nos pontos desejados com o uso de uma massa epóxi. As taxas de deposição são obtidas a partir da pesagem dos vidros de relógio que são coletados.

A metodologia para a amostragem de carbonato dos vidros de relógios segue os padrões utilizados por (Strikis, 2015). As amostras são preparadas no laboratório de Sistemas Cársticos do IGc/USP e são obtidas através da raspagem superficial dos vidros de relógio na porção central, onde observa-se o maior acúmulo de calcita, são realizados de 3 à 4 pontos de raspagem, cada ponto com aproximadamente 300-400 µg de carbonato.

4.3 Análise isotópica de $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ em carbonato recente

As amostras de carbonato de cálcio (CaCO_3) extraídas, são analisadas no Centro de Pesquisas Geocronológicas (LIESP-CPGEO) do IGc/USP através de um espectrômetro de massa de fonte gasosa, modelo DeltaPlus Advantage (Thermo Finningan). As análises dos

isótopos de C e O são realizadas a partir do espectro de massas das moléculas de CO₂, que são liberadas durante a reação de dissolução do CaCO₃ por H₃PO₄. Essas moléculas de CO₂ são arrastadas dos tubos de ensaio através de um fluxo de Hélio para o acessório tipo Finnigan Gas Bench, de onde é separado do vapor d'água dentre outros gases, por um sistema de cromatografia gasosa, o qual opera de forma automatizada.

O espectrômetro contém um triplo coletor de O/C que determina as razões isotópicas do CO₂ obtidas através do carbonato de cálcio por meio de uma fonte iônica. Os resultados analíticos se baseiam na análise de dez alíquotas sequenciais de cada amostra. A precisão das análises é de ± 0,08 ‰ para as razões isotópicas de ¹³C/¹²C e ± 0,1 ‰ para as razões de ¹⁸O/¹⁶O para as amostras de CaCO₃. As razões isotópicas são expressas através da notação ‰ (parte por mil) e nesse caso, expressa a diferença entre a razão da amostra e um valor de padrão internacional (VPDB). Os valores de ¹⁸O e ¹³C fornecidos pelo equipamento são corrigidos a partir da regressão linear dos padrões NBS-18, NBS-19, REI e JCP-1. Os padrões NBS18 e NBS 19 são internacionais, enquanto os padrões REI e VICKS são considerados internos.

5. Resultados Obtidos

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos pelo programa de monitoramento da Lapa da Onça, com os dados de fevereiro de 2018 a setembro de 2023 para os parâmetros ambientais e resultados de taxa de gotejamento, taxa de deposição de carbonato de cálcio, valores isotópicos de carbono e oxigênio em carbonato recente, e também para a comparação dos isótopos estáveis de carbono e oxigênio com os parâmetros ambientais.

A partir dos dados previamente apresentados é possível melhorar o entendimento dos fatores que controlam a temperatura, a taxa de deposição sazonal de carbonato e a variação isotópica do carbono e oxigênio em cavernas e salões ventilados.

5.1 Parâmetros ambientais da Gruta da onça

O monitoramento das condições ambientais da Lapa da Onça iniciou-se em 20/02/2018 com a instalação de medidores de temperatura. Com fins de buscar uma representatividade espacial da temperatura no salão de monitoramento foram selecionadas três regiões principais: i) região mais interna - equivalente a temperatura nos pontos P4-P5; ii) porção mais próxima a entrada - equivalente a temperatura nos pontos P1 iii) região mais central do salão de entrada, onde foi instalado um medidor de CO₂, em 20/05/2018.

O Gráfico 1 traz a comparação das temperaturas medidas nos três diferentes pontos de monitoramento no interior da caverna e a temperatura média resultante. Em verde está representada a temperatura equivalente aos pontos P5-P4, em azul a temperatura para P1, em laranja a temperatura para o ponto junto ao monitoramento de CO₂ e em vermelho a temperatura média desses pontos.

Observa-se também que as temperaturas medidas na região do ponto P1 e na região de monitoramento de CO₂, acompanham a temperatura média da caverna, de forma que as amplitudes não variam muito entre si, ambas variam em torno de 16°C a 26°C. Em contrapartida, a temperatura medida no ponto P5-P4 apresenta menores variações na amplitude em comparação com a média da caverna, variando em torno de 16,8°C e 22,9°C.

Os valores mais elevados ocorrem entre outubro e abril, durante cerca de seis meses as temperaturas médias variam entre 21 e 24°C entre os anos. As temperaturas mínimas, por outro lado, ocorrem em intervalos de tempo mais restritos, entre junho e agosto, quando são registrados valores entre 17 e 19°C.

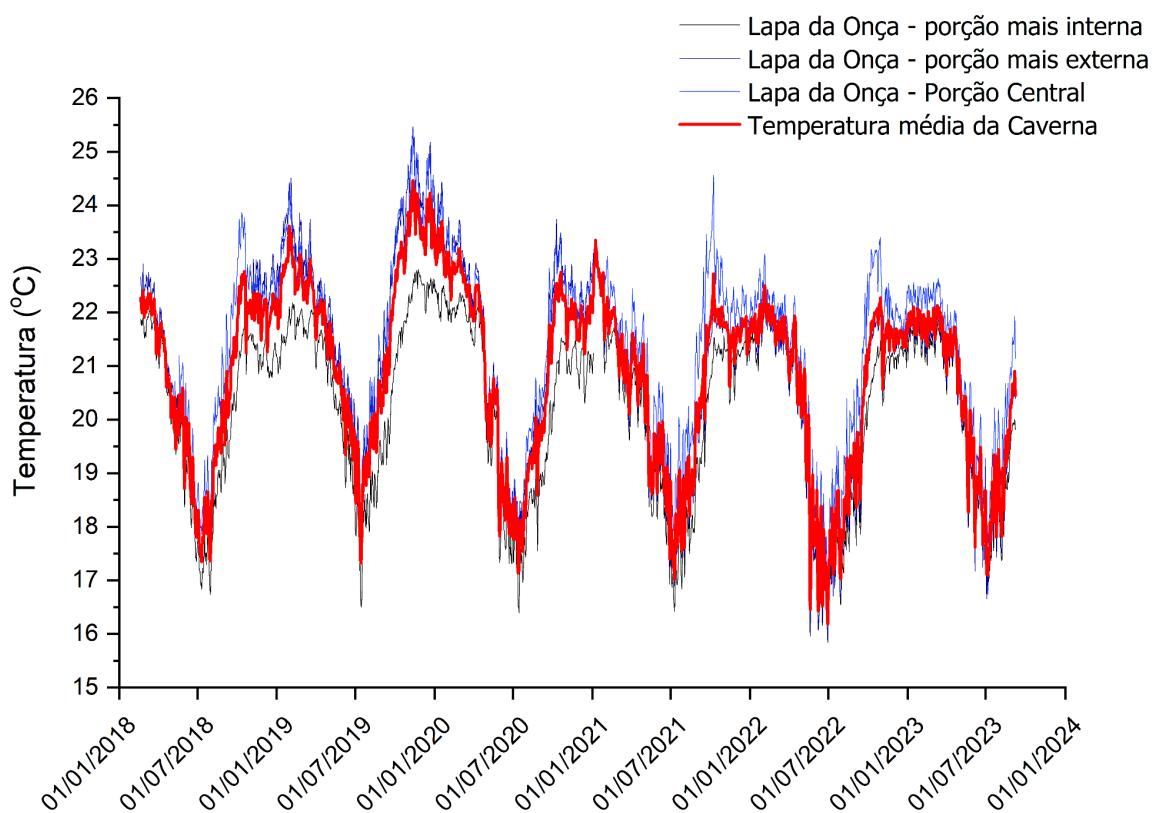


Gráfico 1: Comparação da temperatura nos três diferentes pontos de monitoramento no interior da caverna Gruta da Onça com a temperatura média desses pontos.

A Tabela 1 apresenta o resumo das temperaturas (mínima, média e máxima) da caverna ao longo dos cinco anos de monitoramento, a média da caverna é de 22,8°C, a amplitude térmica de 8,3°C, variando entre 24,5°C e 16,2°C.

Tabela 1: Temperaturas (mínima, média e máxima) medidas no monitoramento da caverna bem ventilada Gruta da Onça.

Temperatura				
Local	Média (°C)	Máxima (°C)	Mínima (°C)	Amplitude Máxima (°C)
Caverna - porção mais interna	20,2	22,8	15,8	4,3
Caverna - porção mais externa	21,0	25,5	15,9	9,6
Média Caverna	20,8	24,5	16,2	8,3
Ambiente externo	24,7	41,6	0,0	41,6

Os gráficos 2 a 4 comparam, respectivamente, as séries de temperatura média da caverna com as séries de temperaturas mínimas e máximas do ambiente externo. A partir deles observamos que as flutuações sazonais do salão de monitoramento são controladas pelas variações da temperatura ambiente externo. Entretanto, quando comparamos em termos de valores absolutos é possível observar que a temperatura do salão se aproxima com as mínimas diárias do ambiente externo (Gráfico 3).

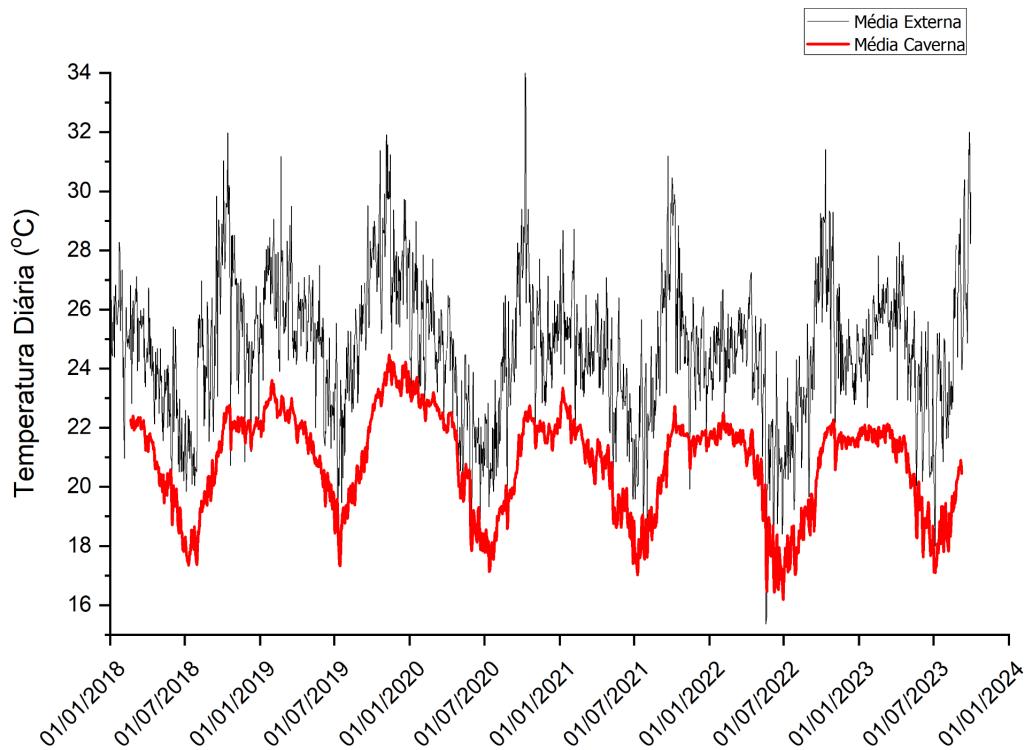


Gráfico 2: Comparação entre as séries de temperaturas médias diárias da Lapa da Onça com o ambiente externo (estação meteorológica INMET de Januária OMM 83386).

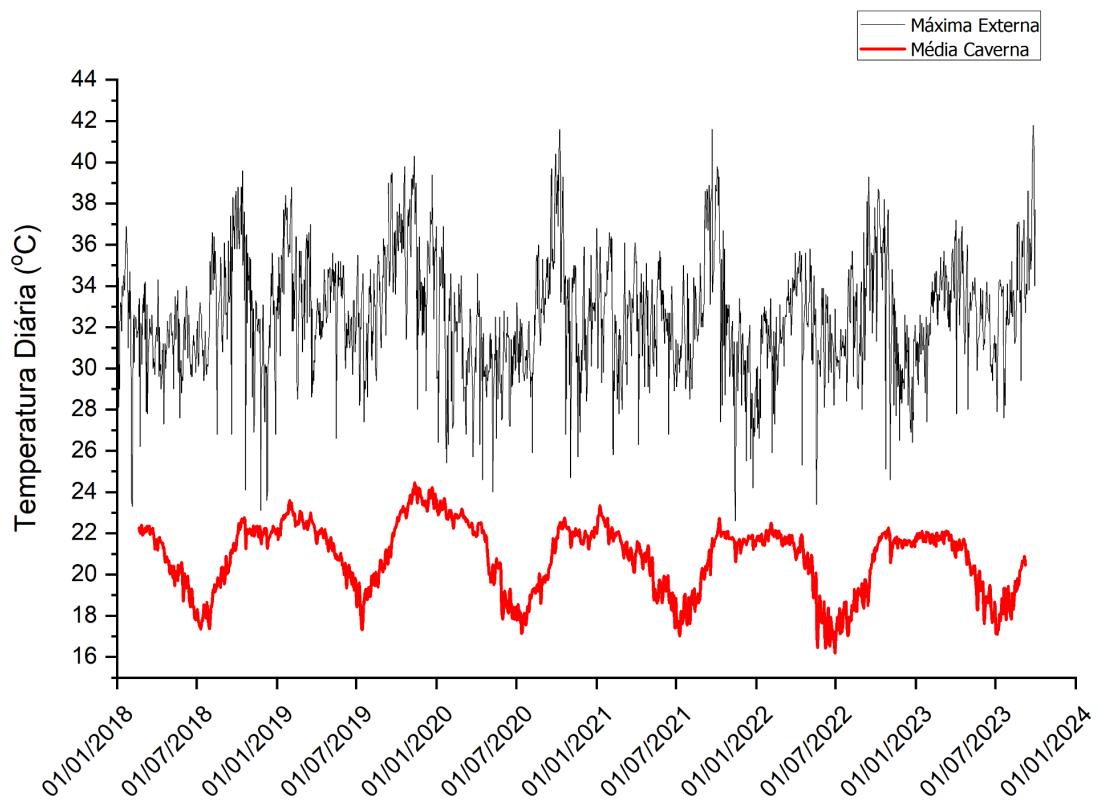


Gráfico 3: Comparação entre as séries de temperaturas máximas diárias da Lapa da Onça com as máximas do ambiente externo (estação meteorológica INMET de Januária OMM 83386).

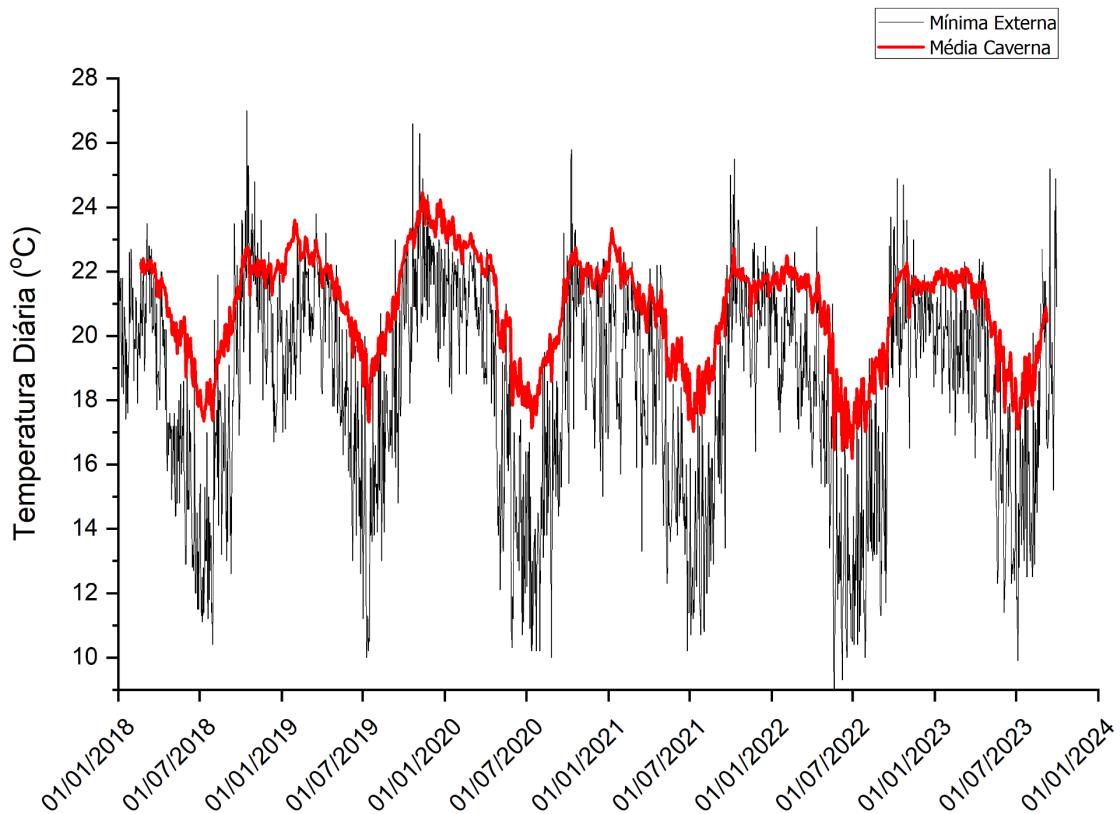


Gráfico 4: Comparação entre as séries de temperaturas mínimas diárias da Lapa da Onça com as mínimas do ambiente externo (estação meteorológica INMET de Januária OMM 83386).

Similarmente, foram construídos três gráficos de dispersão com os dados de temperatura mínima, máxima e média do ambiente externo comparando-as com as temperaturas médias no interior da caverna (Gráfico 5).

A partir desses gráficos de dispersão foram obtidas três diferentes equações da reta, uma para cada caso. Possibilitando constatar que as temperaturas máximas do ambiente externo são as que menos se aproximam da temperatura média da caverna, com o coeficiente angular da reta de aproximadamente 0,17. Por outro lado, as temperaturas mínimas do ambiente externo se aproximam um pouco mais, com o coeficiente angular da reta de aproximadamente 0,44. Já as temperaturas médias do ambiente externo são as que mais se aproximam da média da caverna, com o coeficiente angular de aproximadamente 0,53. Sendo esse o coeficiente angular mais próximo de 1, evidenciando uma clara correspondência entre a média anômala externa e interna.

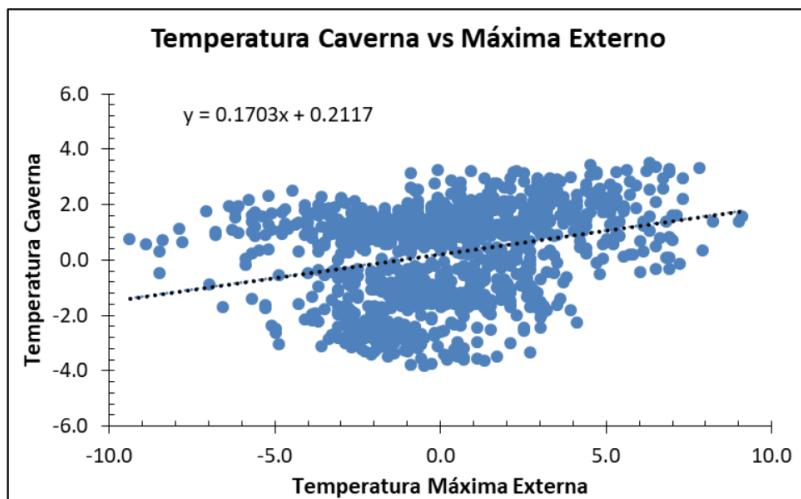
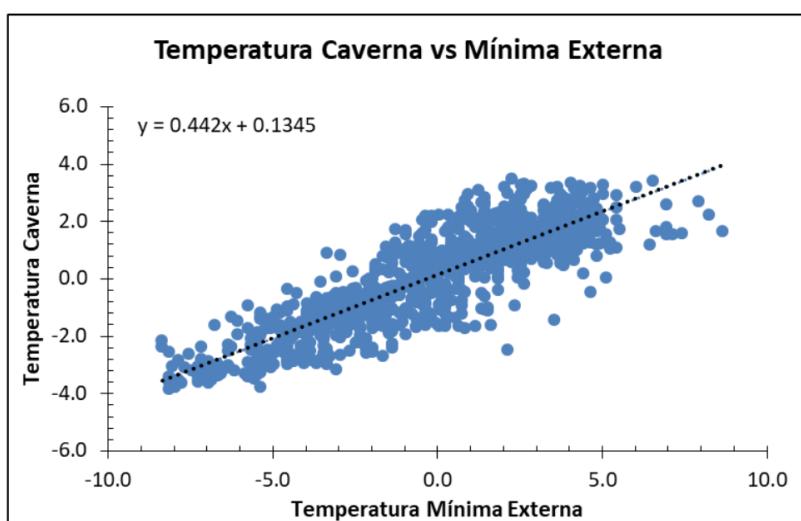
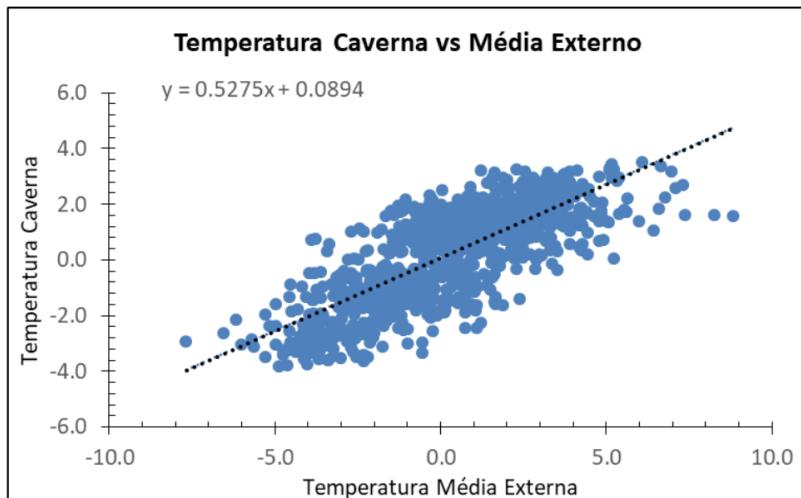
a)**b)****c)**

Gráfico 5: Análise de dispersão (a) Temperatura mínima externa X Temperatura média da caverna. (b) Temperatura média externa X Temperatura média da caverna. (c) Temperatura máxima externa X Temperatura máxima da caverna. Os valores de temperatura são apresentados em séries de anomalia

Outro importante parâmetro é a Umidade Relativa, a qual também foi monitorada em todos os pontos no interior da caverna, assim como a temperatura. Ao longo dos 5 anos de monitoramento, a umidade relativa da caverna varia entre valores máximos de, aproximadamente, 100% a mínimos próximos de 51%. Os pontos de monitoramento apresentam boa consistência quanto aos valores absolutos e amplitude das variações sazonais e interanuais. A feição mais notável da série de monitoramento é a tendência de aumento gradual da umidade relativa entre os anos de 2018 e 2023

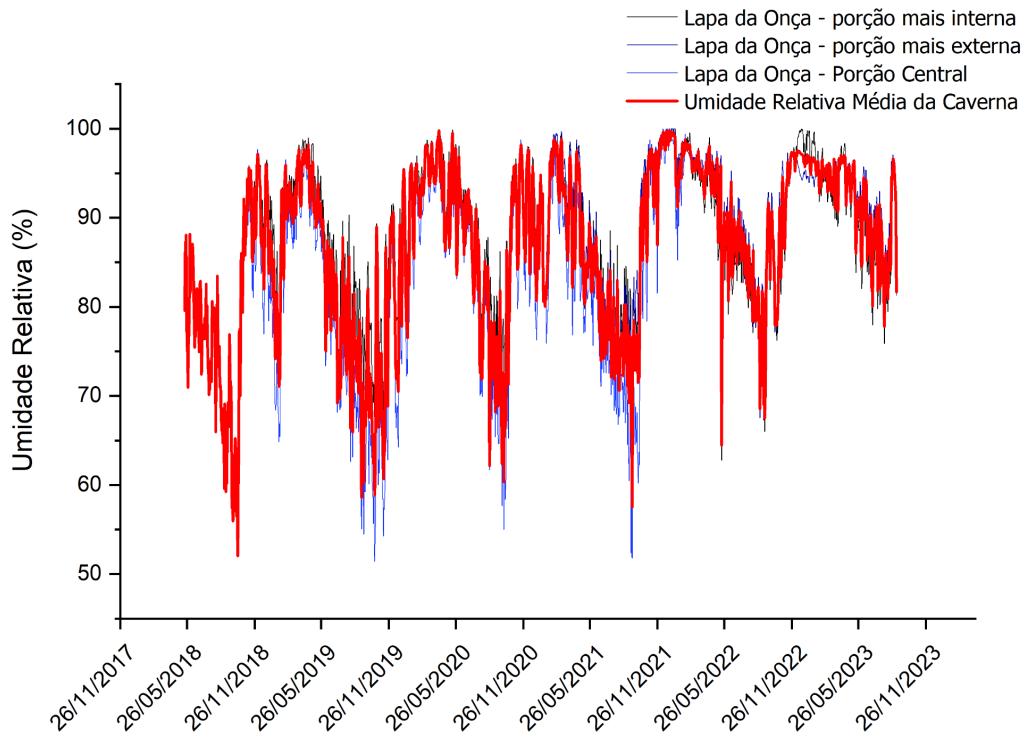


Gráfico 6: Comparação da Umidade Relativa nos três diferentes pontos de monitoramento no interior da caverna Gruta da Onça com a média desses pontos.

O Gráfico 6 compara a umidade relativa média no interior da caverna com a umidade relativa do ambiente externo, observa-se uma forte relação entre os fatores, apontada pela sobreposição das curvas no gráfico. Também observa-se que os períodos com maior umidade relativa são entre os meses 11 (novembro) e 03 (março), e os meses com menor umidade relativa são entre junho (06) e setembro (09). Os meses com maior umidade relativa correspondem aos meses com maior acumulado de chuva mensal, assim como os meses de menor umidade relativa também correspondem aos meses com menor precipitação. Contudo, diferentemente da chuva, cuja diminuição ocorre de forma abrupta, a variação sazonal de umidade relativa apresenta transições mais graduais, com uma longa tendência de diminuição de aproximadamente 5 meses, com início ao redor de maio e término em outubro Gráfico 6. Apesar da umidade relativa da caverna estar fortemente

controlada pelas condições do ambiente externo (Gráfico 7), a comparação com a série de chuva por outro lado permite indicar que o aumento da umidade no salão de monitoramento entre os anos de 2018 e 2023 tem relação com o aumento da recarga de chuva (Gráfico 8).

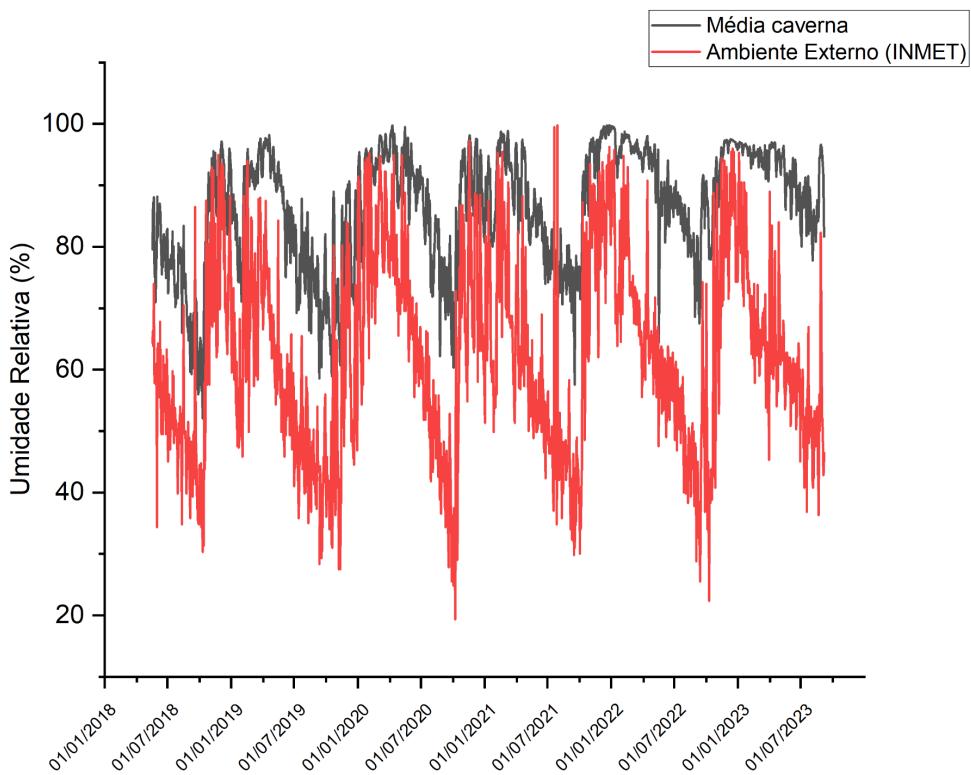


Gráfico 7: Comparação da umidade relativa média no interior da caverna com a umidade relativa do ambiente externo.

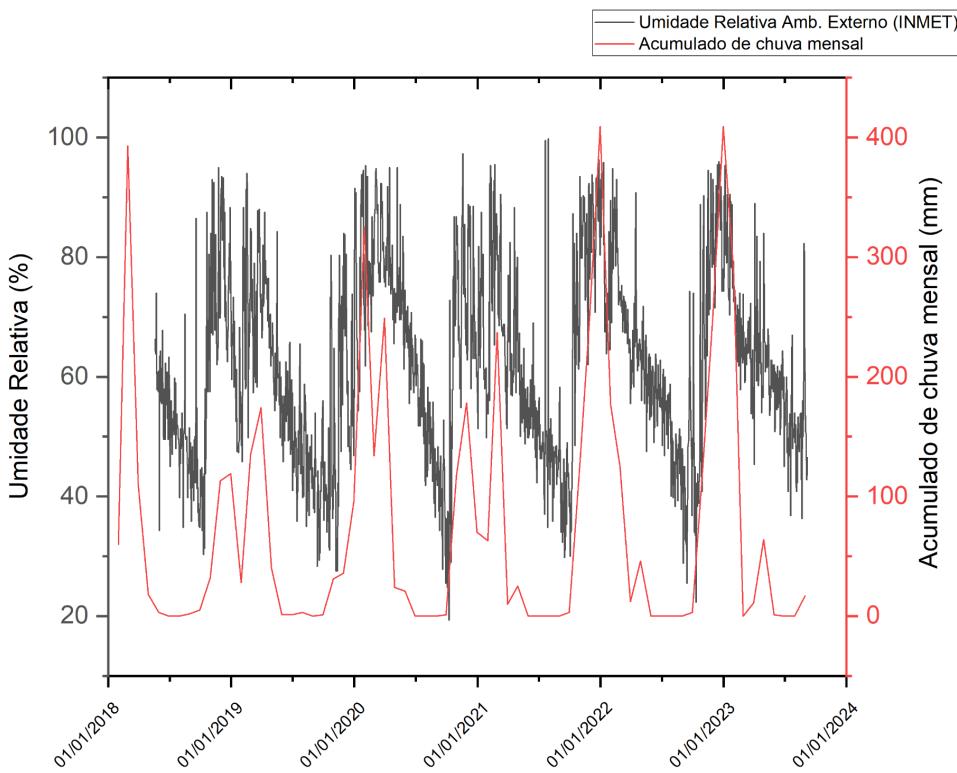


Gráfico 8: Resultado do acumulado de chuva mensal durante os 5 anos de monitoramento, na estação do INMET na região do Peruáçu.

5.2 Taxa de gotejamento

A Tabela 1 do Anexo I apresenta os valores da taxa de gotejamento nos cinco pontos de monitoramento da Lapa da Onça. O período de amostragem (PA) avaliado foi de 07/04/2018 à 08/09/23. Através da tabela observa-se que o tempo de gotejamento durante o período monitorado apresentou valores que variam de 19 segundos (13/07/2019) a 12 minutos e 29 segundos (9/9/2019).

Para uma melhor comparação das taxas de gotejamento entre os pontos de monitoramento foi realizada a normalização dos dados a partir do cálculo do z-score de acordo com a equação 1. A medida numérica em z-score permite a análise das variações relativas de uma série de medidas quaisquer em função do desvio padrão. Em termos práticos, essa notação permite analisar a consistência das flutuações sazonais dos dados, analisando-os sob uma mesma escala relativa de variação, eliminando o efeito das escalas de variação de amplitude entre as séries.

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Equação 1

onde:

z = valores em z-score

x = dado

μ = média

σ = desvio padrão

O Gráfico 9 compara a taxa de gotejamento normalizada (z-score) nos cinco pontos de monitoramento no interior da Lapa da Onça durante o período estudado. A análise do comportamento da taxa de gotejamento (Gráfico 9) sugere certa consistência na variação sazonal. De modo geral, os valores mais elevados de gotejamento foram registrados em setembro de 2018, janeiro, junho, agosto e setembro de 2019, dezembro de 2021, e setembro de 2022 e 2023.

Sabe-se que para haver gotejamento ativo é necessário que haja a recarga autogênica do carste. i.e. infiltração de água meteórica por meio de fraturas, fissuras ou ainda de forma difusa. Por essa razão a comparação entre a taxa de gotejamento e acumulado de chuva mensal na região é extremamente relevante. O Gráfico 10 compara a relação entre os acumulados mensais de chuva regionais com a frequência dos gotejamentos. Observa-se que a resposta da taxa de gotejamento em relação aos picos de acumulado de chuva mensal ocorre após 6 a 9 meses. Essa relação sugere uma resposta tardia do gotejamento, causada pelo tempo de percolação da água através dos condutos do carste.

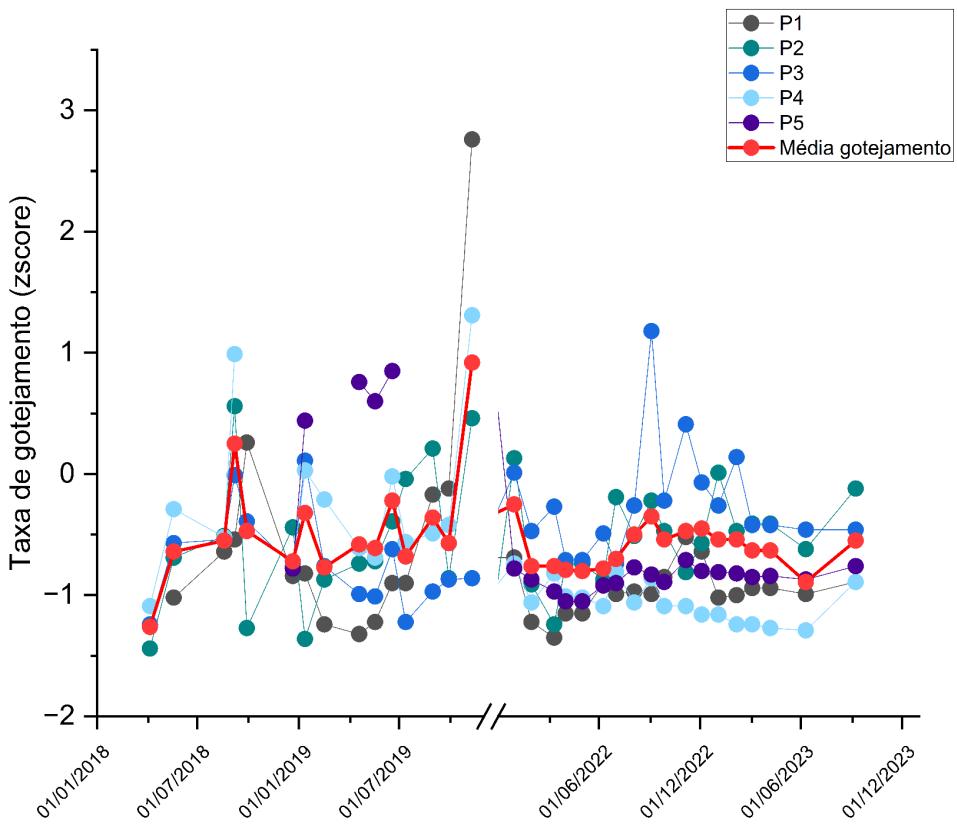


Gráfico 9: Comparação da taxa de gotejamento normalizada (Z-Score) para os 5 pontos de monitoramento na Gruta da Onça e a média desses pontos.

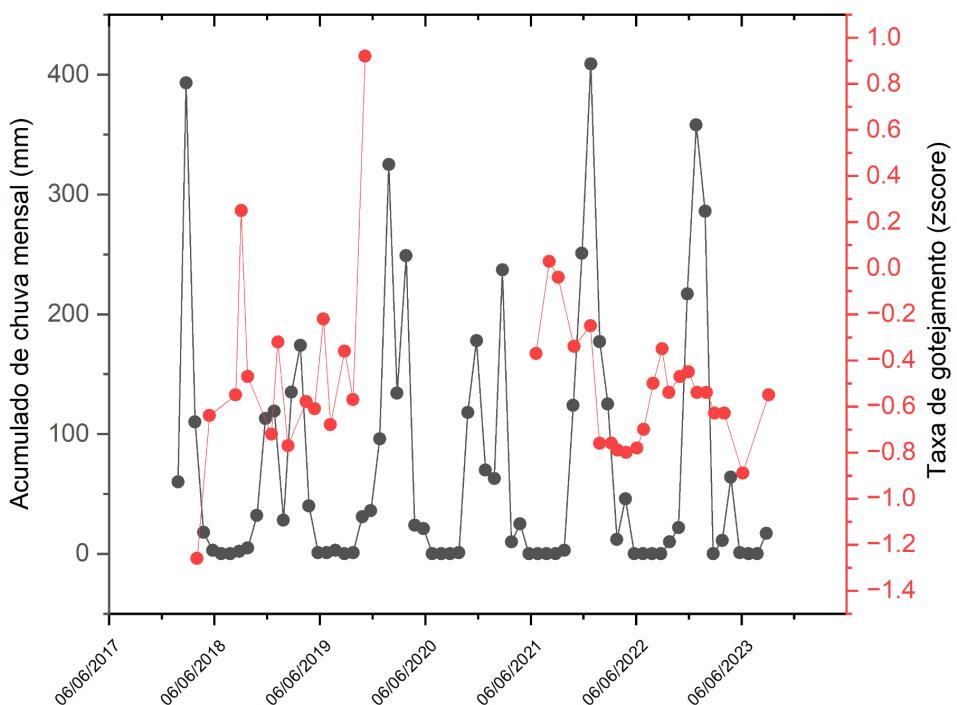


Gráfico 10: Comparação entre a taxa de gotejamento (zscore) e o acumulado de chuva mensal (mm) na região.

5.3 Taxa de deposição de carbonato de cálcio

A Tabela 2 do Anexo I apresenta os valores da taxa de deposição de carbonato de cálcio nos cinco pontos de monitoramento da Lapa da Onça. O período de amostragem (PA) avaliado foi de 20/02/2018 à 08/09/23. Para fazer a comparação entre a taxa de deposição com os demais parâmetros ambientais foi necessário normalizar os dados, através do z-score, para minimizar os efeitos da variância (Gráfico 12).

A partir da análise das taxas de deposição nos cinco diferentes pontos de monitoramento e a média dos pontos (Gráfico 11), observa-se que a precipitação de carbonato de cálcio também segue certa sazonalidade. Os valores mais elevados de deposição, de forma geral, ocorrem entre janeiro e maio, e os menores entre julho e setembro.

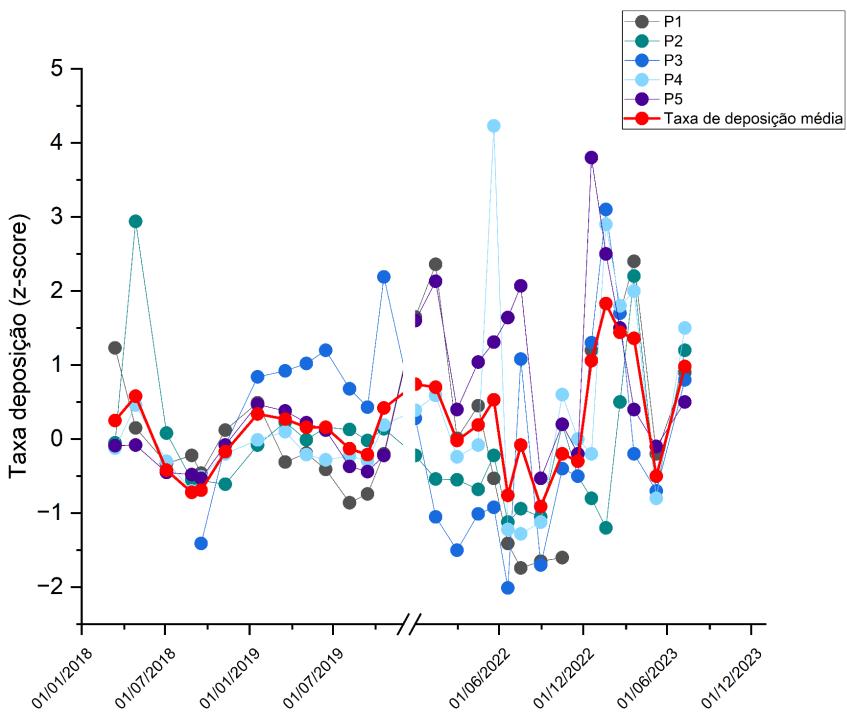


Gráfico 11: Comparação da taxa de deposição normalizada (z-score) para os 5 pontos de monitoramento (P1, P2, P3, P4 e P5) na Gruta da Onça e a média desses pontos.

O Gráfico 12 explora a comparação entre as curvas médias de gotejamento e taxa de deposição, ambas normalizadas (z-score). A comparação entre as curvas médias revela certa inconsistência, sobretudo quanto à sincronia dos ciclos sazonais. Essa inconsistência pode resultar da elevada variância entre os gotejamentos. Diferente da deposição, as curvas de gotejamento apresentam menor consistência entre si, como pode ser observado

na relação entre as curvas médias e as séries individuais dos pontos de monitoramento apresentados nos gráficos 9 e 11.

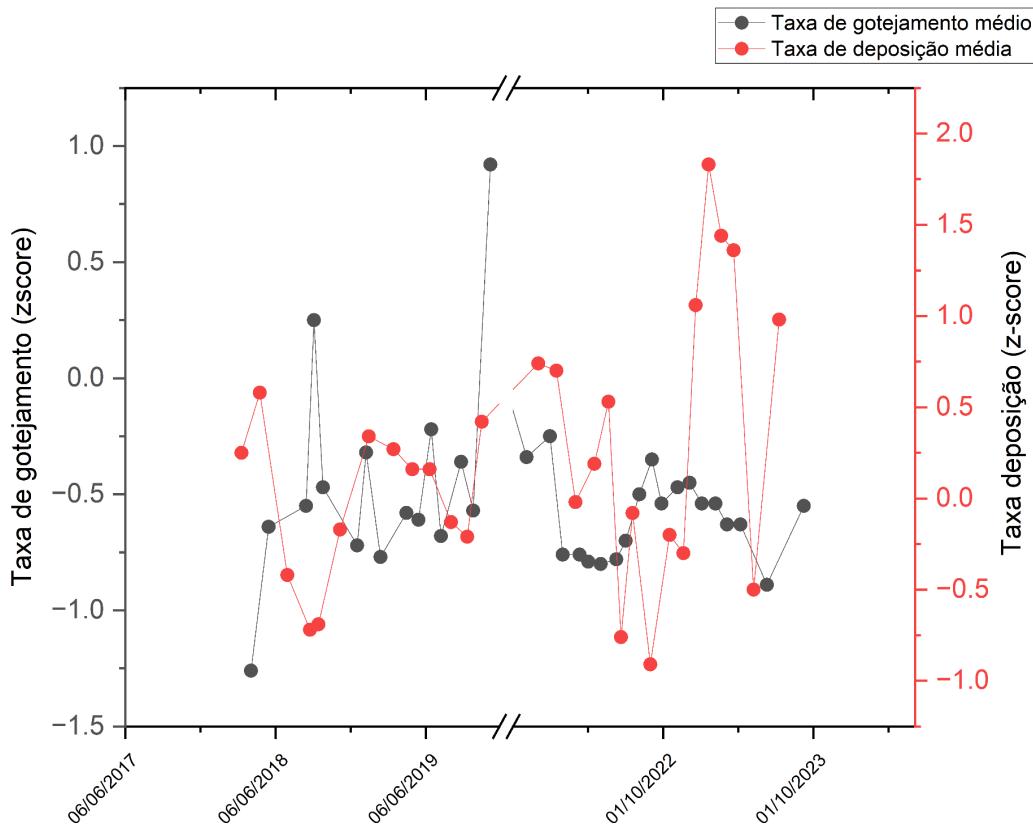


Gráfico 12: Comparação entre a taxa de gotejamento normalizada (z-score) e a taxa de deposição normalizada (z-score).

Para contornar esse problema, no gráfico 13 é apresentada as comparações entre as taxas de deposição e gotejamento dos pontos de monitoramento individualmente. Diferentemente da comparação utilizando as curvas médias, as comparações individualizadas dos pontos de monitoramento apresentam uma melhor consistência entre os ciclos de deposição e gotejamento. Entretanto, ainda sim persistem certas discrepâncias, de modo que nem sempre as variações de vazão apresentam correspondência direta com a taxa de gotejamento, sendo recorrentes picos abruptos de variação de vazão dentro de um ciclo sem correspondência direta da taxa de deposição. Do mesmo modo, em alguns casos, como ocorre no ponto P2 a partir de 2023, é possível observar tendências de aumento da taxa de deposição de forma independente da vazão. Essas inconsistências localizadas resultam do fato que a disponibilidade de gotejamento não é o único fator controlador da taxa de deposição de calcita. De fato, variações da concentração de cálcio bem como da própria alcalinidade da solução podem exercer um forte controle da supersaturação de calcita (Dreybrodt, 1980; Buhmann & Dreybrodt, 1985).

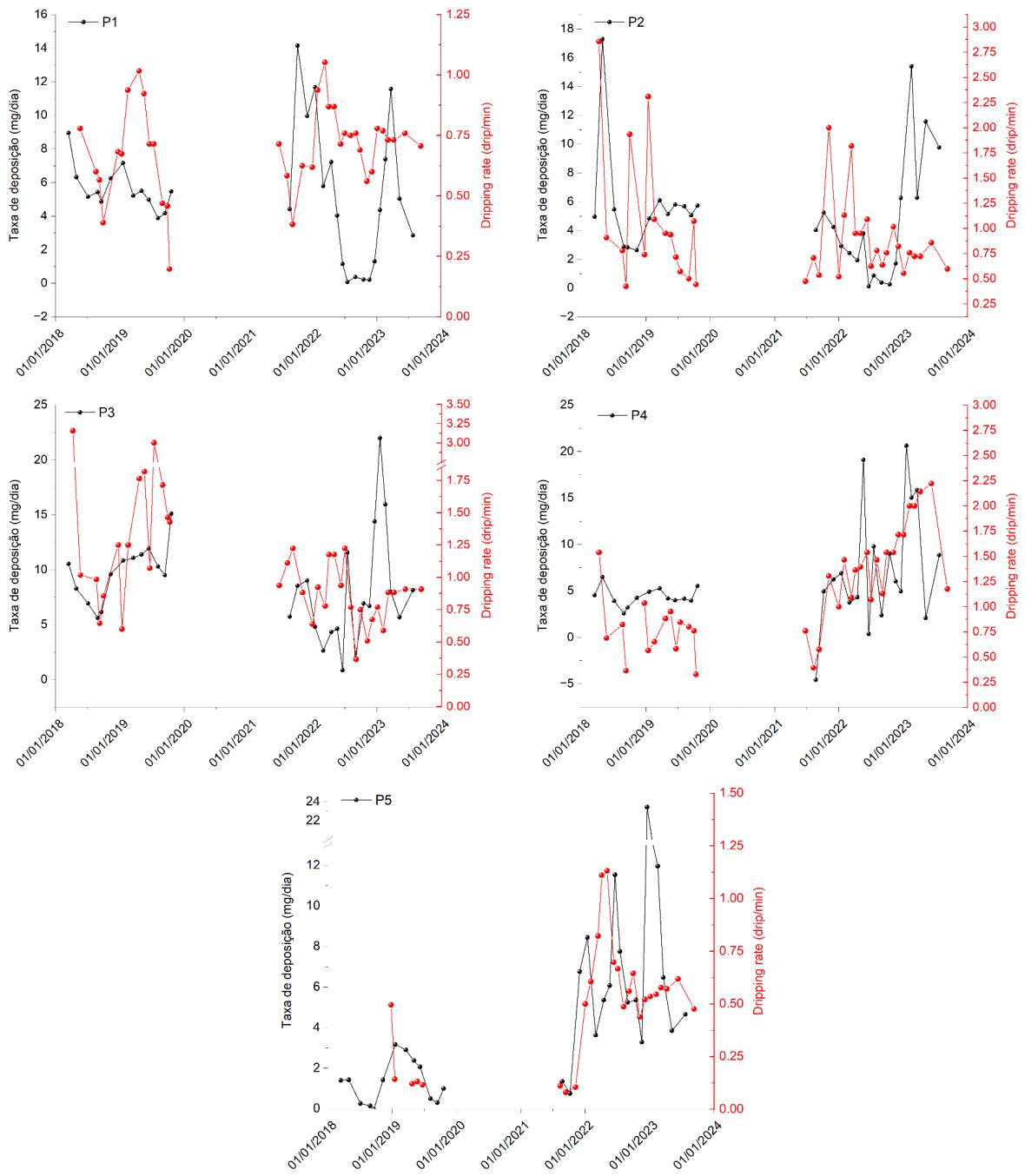


Gráfico 13: Comparação entre a taxa de gotejamento (gotas/min) e a taxa de deposição (mg/dia) dos pontos de monitoramento da Lapa da Onça.

Entre outros fatores que podem controlar a taxa de deposição está a temperatura. Como é apresentado no Gráfico 14 as fases de maior deposição média encontram boa consistência com os períodos onde a temperatura média da caverna está mais elevada . O mecanismo físico que relaciona a variação da taxa de deposição de calcita com a temperatura, tem relação com a solubilidade do CO₂, o qual apresenta diminuição com o

aumento da temperatura, favorecendo a precipitação de calcita por degaseificação (Fairchild; Baker, 2012).

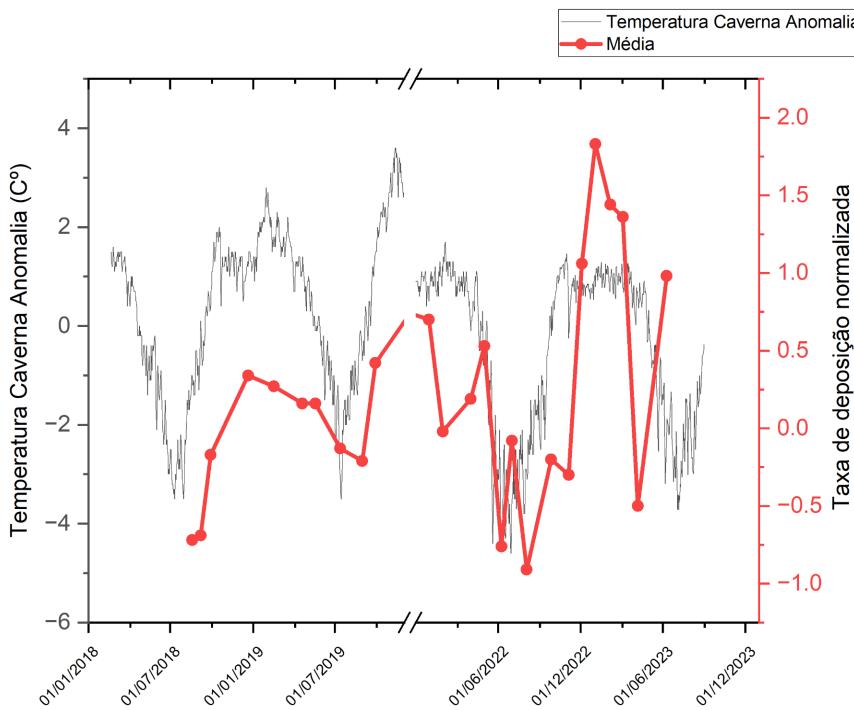
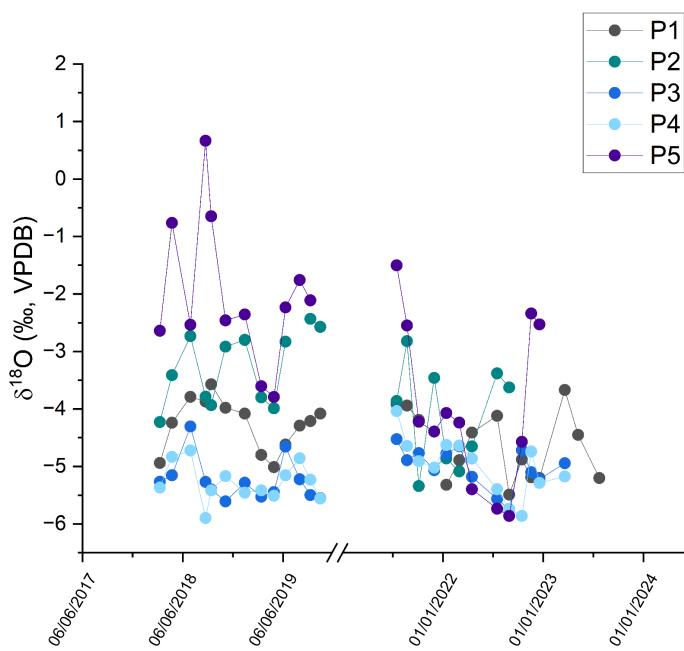
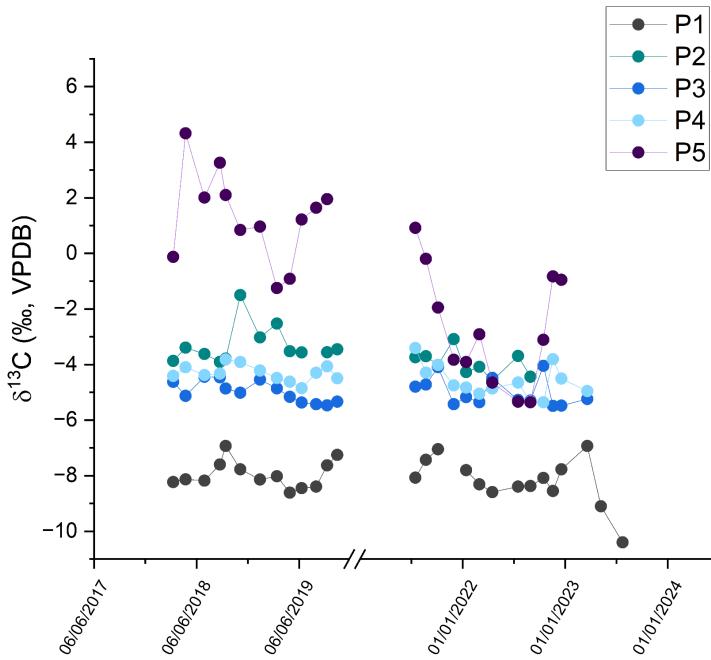


Gráfico 14: Comparação entre série temporal da taxa de deposição com a temperatura média (°C)

5.3 Isótopos estáveis de carbono e oxigênio em carbonato recente

Foram realizadas análises para isótopos estáveis de carbono e oxigênio em carbonatos recentes em cerca de 520 amostras, extraídas de 130 vidros (29 vidros do P1, 23 do P2, 26 do P3, 23 do P4 e 26 do P5), referentes a quase cinco anos de monitoramento (de 02/2018 a 12/2019 e 06/2021 a 09/2023). Os resultados obtidos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$, estão expostos graficamente nas Gráficos 15 e 16, respectivamente. Nos Gráficos 17 e 18 os dados são comparados normalizados com a finalidade de apresentar uma curva que melhor expressa as variações relativas entre os dados.

Tanto para os valores de $\delta^{18}\text{O}$ (Gráfico 15) como de $\delta^{13}\text{C}$ (Gráfico 16), observa-se variações consistentes na escala sazonal e interanual, apresentando uma tendência de redução ao longo dos anos de monitoramento.



No Gráfico 17 a curva vermelha representa a média dos dados de $\delta^{18}\text{O}$ normalizado em relação aos cinco pontos de monitoramento, a amplitude dos dados varia de -2 a 2. O Gráfico 18 exibe a comparação do $\delta^{13}\text{C}$ normalizado dos cinco pontos de monitoramento e a média desses pontos, representada pela a curva vermelha. De modo semelhante, os dados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ observados descrevem uma tendência consistente de redução dos valores ao longo dos anos monitorados.

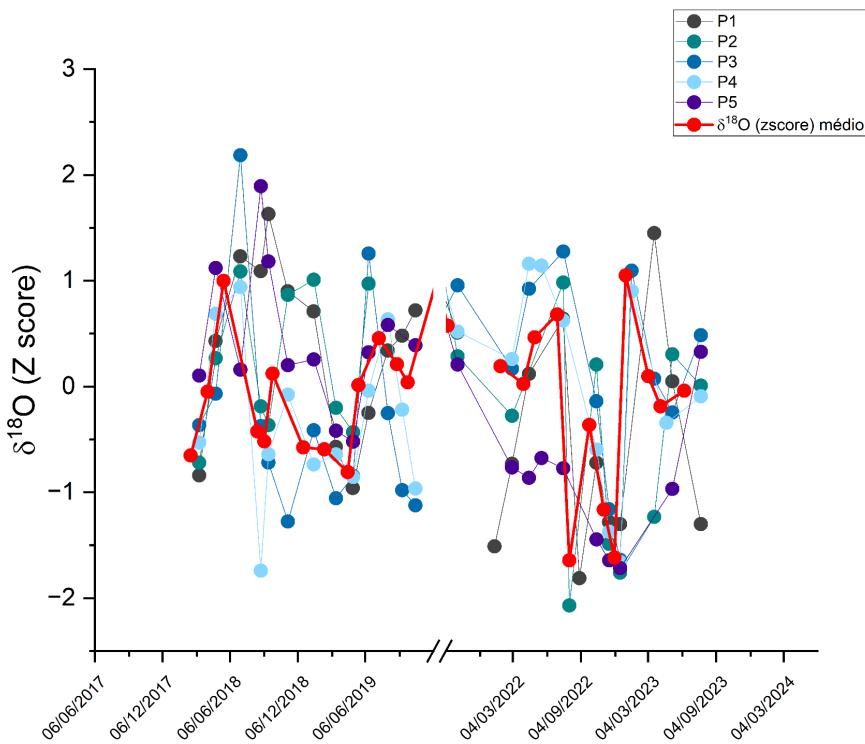


Gráfico 17: Comparação do $\delta^{18}\text{O}$ normalizado de cada ponto da caverna com a média desses valores.

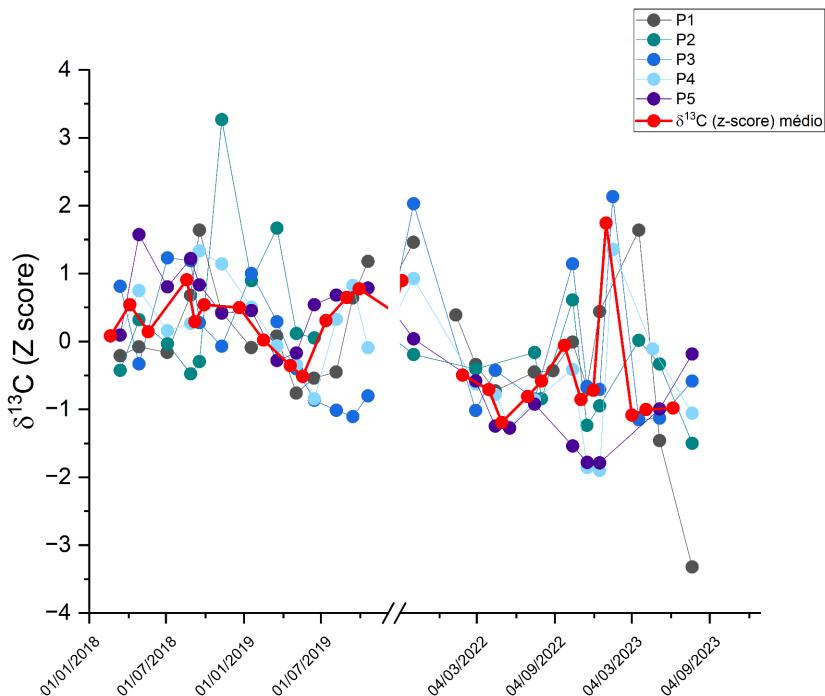


Gráfico 18: Comparação do $\delta^{13}\text{C}$ normalizado de cada ponto da caverna com a média desses valores.

5.4 Isótopos estáveis de carbono e oxigênio e os parâmetros ambientais

Neste tópico são relacionados os parâmetros ambientais de temperatura e umidade relativa com os valores de isótopos estáveis de carbono e oxigênio. Não é abordado a pluviosidade nesse tópico, pois esse parâmetro controla apenas a taxa de gotejamento da caverna, sendo assim sua comparação não tem coerência.

Para entender a relação das respostas isotópicas com a temperatura do ambiente externo, é apresentado um gráfico comparativo dos valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ normalizados com a temperatura da caverna durante o período monitorado (Gráfico 19). A partir de então, é possível notar que existe correlação entre os fatores, foram observados sete períodos de pico de temperatura anômala da caverna (03/2018, 10/2018, 02/2019, 11/2019, 04/2022, 10/2022, 04/2023) os quais correspondem com os valores mais altos do $\delta^{13}\text{C}$ normalizado. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ também apresentam boa relação com a temperatura anômala da caverna, no entanto é mais evidente com os valores de $\delta^{13}\text{C}$ normalizados.

O Gráfico 20 apresenta a comparação do $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ normalizados da calcita com a umidade relativa no interior da caverna, os parâmetros apresentam correlação muito semelhante entre os valores. Pode-se observar, que os pontos com menor umidade relativa também apresentam menores valores de $\delta^{18}\text{O}$, que correspondem aos os meses 10 e 11, os quais também correspondem aos meses com temperaturas mais elevadas, que tendem a favorecer fenômenos evaporativos.

Por outro lado, os maiores valores tanto de umidade relativa quanto de $\delta^{18}\text{O}$, aparecem entre os meses 5 e 8, que correspondem a meses com temperaturas mais amenas e sucedem o período chuvoso, os meses entre 4 e 6 apresentam a maior umidade relativa e maior $\delta^{13}\text{C}$ anômalo da calcita, enquanto os meses 10 e 11 apresentam menores taxas de umidade relativa e de $\delta^{13}\text{C}$.

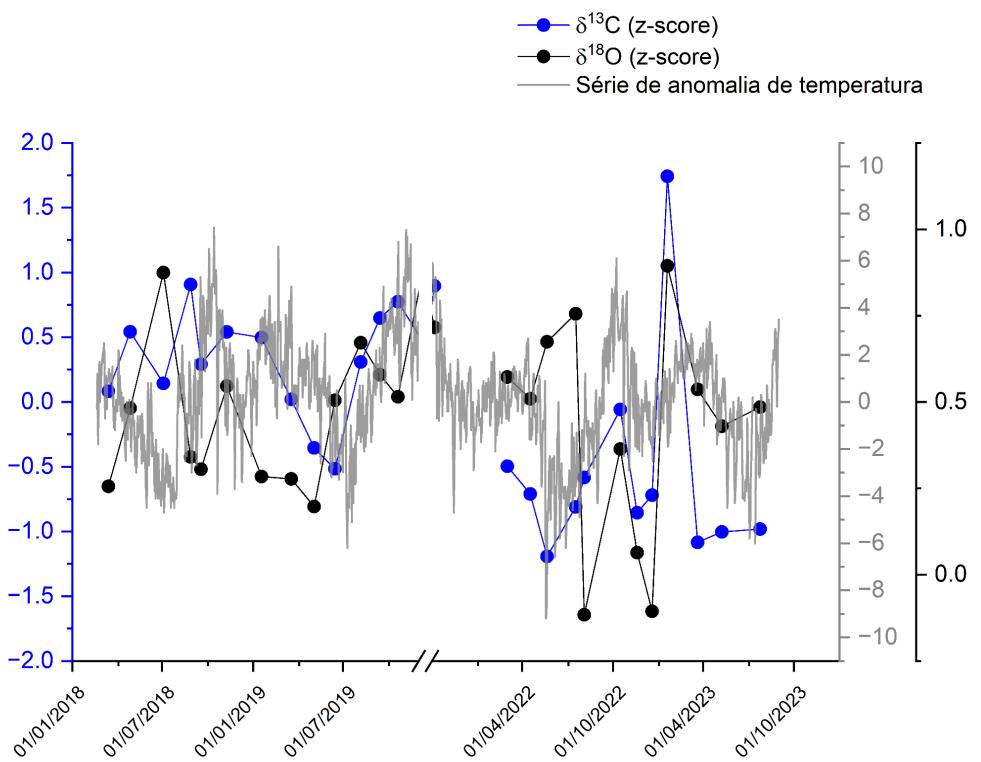


Gráfico 19: Comparação de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ normalizados com a temperatura anômala da caverna durante o período monitorado.

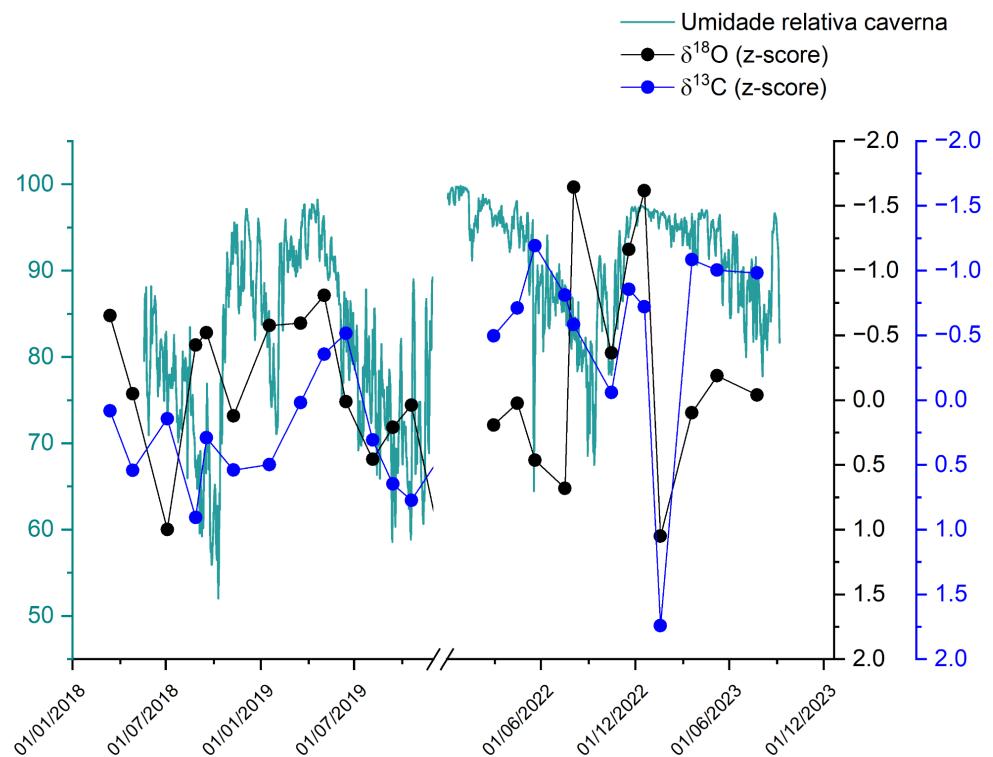


Gráfico 20: Comparação de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ normalizados com a umidade relativa no interior da caverna durante o período monitorado.

6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Efeitos controladores da variabilidade isotópica na escala sazonal

Nesse tópico são discutidas as principais variáveis ambientais responsáveis pelo controle da composição isotópica na escala sazonal, i.e. intra-anual.

Os dados do monitoramento de fevereiro de 2018 a setembro de 2023 indicam que a temperatura média da caverna apresenta variações de aproximadamente 8,3°C, ficando entre 24,5°C e 16,2°C. As temperaturas mais altas são observadas entre os meses de outubro e março/abril e as temperaturas mais baixas, por outro lado, ocorrem em intervalos de tempo menores, de junho a agosto, quando são registrados valores entre 15,8 e 16,2°C. Os pontos com maiores variações na amplitude térmica são os pontos P1-P4 e PCO₂ assim como a média da caverna, já o ponto P5 apresenta menores variações na amplitude em comparação com a média da caverna. A amplitude sazonal de 8,5°C é sensivelmente mais elevada que as amplitudes sazonais observadas para salões confinados, onde são observadas variações máximas de 0,5°C como ocorre para a caverna Lapa dos Anjos por Strikis (2015), localizado no município de Januária a cerca de 40 km da Lapa da Onça.

A partir da comparação entre a temperatura média da caverna com as temperaturas mínimas, máximas e médias do ambiente externo, foi possível concluir que a temperatura no interior da caverna é mais compatível com a temperatura mínima do ambiente externo.

Em relação às taxas de umidade relativa, a Lapa da Onça registra variações ao redor de 50 %, com oscilações sazonais coincidentes com o ambiente externo conforme comparações com séries de medições da estação meteorológica de Januária. Assim como observado para os dados de temperatura, a umidade relativa é contrastante com valores registrados em ambientes de caverna de circulação de ar restrita que, frequentemente, apresentam valores constantes ao redor de 100 % ao longo de todo ano hidrológico (Strikis, 2015; Cruz et al., 2007).

Já em relação à taxa de gotejamento, observa-se um atraso na resposta desse parâmetro em relação ao acumulado de chuva mensal, as maiores taxas de gotejamento ocorrem de 6 a 9 meses após os maiores períodos de acúmulo de chuva na região. Isso é devido ao tempo de percolação da água meteórica que abastece o sistema cárstico, penetrar e chegar no conduto com gotejamento ativo.

A taxa de gotejamento é um parâmetro diretamente relacionado com a taxa de deposição do CaCO₃, é a partir da solução da água do gotejamento que ocorre a deposição do carbonato de cálcio. Contudo, conforme observado, a variação de gotejamento não é a única variável responsável pelo controle da taxa de deposição. De fato, variáveis ambientais como temperatura podem exercer forte controle sobre a taxa de deposição ao incidir sobre

a solubilização do CO₂. Essa relação fica evidente na comparação entre a curva média de posição de CaCO₃ e a temperatura média do salão de monitoramento. Fairchild & Baker (2012) aponta que a relação de deposição com as temperaturas mais elevadas são devido a solubilidade do CO₂, que diminui com o aumento da temperatura e favorecendo a precipitação de calcita por degaseificação.

Os dados de δ¹⁸O e δ¹³C apresentam ciclos sazonais consistentes com as variações de temperatura e umidade relativa. Tanto a umidade relativa quanto a temperatura são passíveis de afetar a composição isotópica de carbono e oxigênio dos espeleotemas a partir de efeitos sobre o fator de fracionamento isotópico. Condições de baixa umidade relativa pode levar a efeitos de fracionamento cinéticos, i.e., quando a deposição ocorre fora das condições de equilíbrio químico (Dreybrodt, 2008; Mickler et al., 2004). O fracionamento cinético ocorre em reações irreversíveis, portanto, em condições longe do equilíbrio químico. Essas condições tendem a favorecer efeitos de empobrecimento ou enriquecimento isotópico das fases envolvidas nas reações. Por exemplo, no caso da deposição de calcita por gotejamento em condições de baixa umidade relativa, a contínua remoção de isótopos leves de oxigênio da solução de gotejamento por perdas evaporativas leva ao enriquecimento de oxigênio da fase mineral precipitada, no caso, a calcita (Deininger et al., 2012). Desse modo, temos uma relação inversa entre δ¹⁸O_{calcita} e a umidade relativa da caverna.

A temperatura por outro lado tem efeito direto sobre o fator de fracionamento isotópico ($\alpha_{\text{calcita-água}}$) expressa pela seguinte relação:

$$\alpha = \frac{R_A}{R_B}$$

Equação 2

A letra α da equação é o fator de fracionamento isotópico e R é a razão isotópica (eg. ¹⁸O/¹⁶O) das fases A e B (Lanchniet, 2009). Nesse sentido, as fases são controladas pelo fator α, para a reação de deposição de calcita o α_{calcita-água} é dado pela seguinte reação:

$$\alpha_{\text{calcita-água}} = \frac{\left(\frac{180}{160}\right)_{\text{calcita}}}{\left(\frac{180}{160}\right)_{\text{água}}}$$

Equação 3

Em termo de $\delta^{18}\text{O}$ é dado pela reação (Stríkis, 2015):

$$1000 \ln \alpha_{\text{calcita}-\text{água}} = \frac{\frac{\delta^{18}\text{O}_{\text{calcita}}}{1000} + 1}{\frac{\delta^{18}\text{O}_{\text{água}}}{1000} + 1} = \frac{1000 + \delta^{18}\text{O}_{\text{calcita}}}{1000 + \delta^{18}\text{O}_{\text{água}}}$$

Equação 4

O fator de fracionamento isotópico, α , é controlado, entre outros fatores, pela temperatura (Lanchniet, 2009) conforme a equação de Johnston et al. (2013):

$$1000 \ln \alpha = 17.66 (1000/T) - 30,16$$

Equação 5

Onde T é a temperatura e o fator de fracionamento é dado em termos de $1000 \times \ln \alpha$.

Com base nessas reações, foi realizado o cálculo do $\delta^{18}\text{O}$ teórico para a caverna Lapa da Onça, com os dados obtidos ao longo do monitoramento. O resultado é exposto no Gráfico 21, a curva vermelha representa o $\delta^{18}\text{O}$ teórico e a curva preta representa o $\delta^{18}\text{O}$ calculado (VPDB), as quais se relacionam explicitamente. Para efeitos de comparação da amplitude sazonal Gráfico 21 são apresentados os valores de $\delta^{18}\text{O}$ em termos de anomalia ($x - \bar{x}$) na escala de ‰.

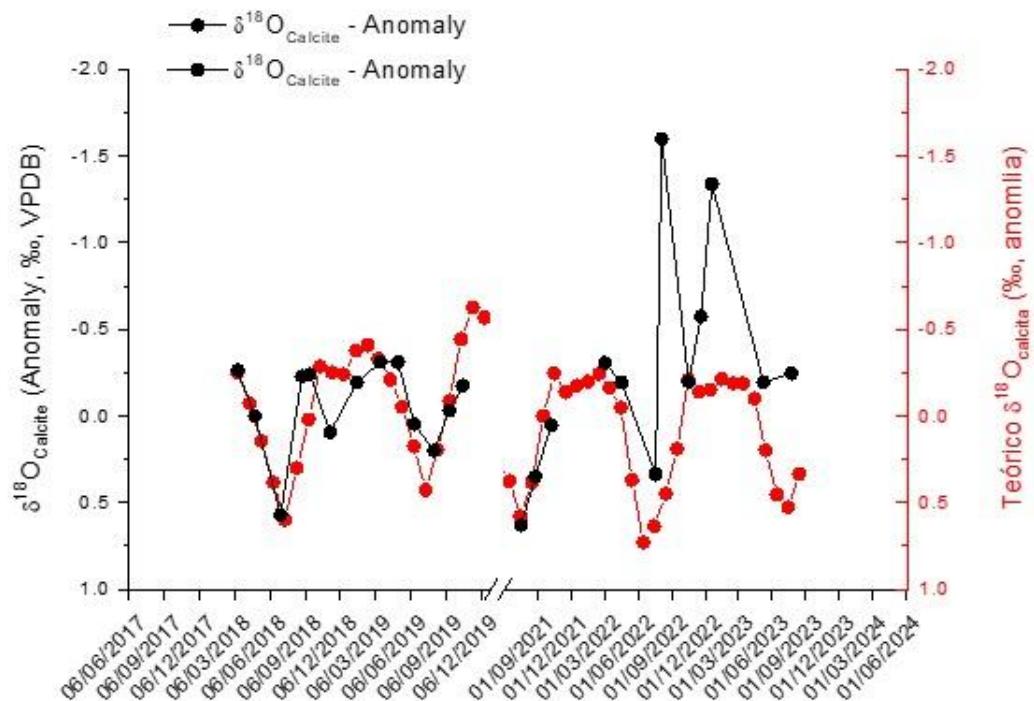


Gráfico 21: Comparação entre o $\delta^{18}\text{O}$ da calcita medido e o $\delta^{18}\text{O}$ teórico calculado considerando o efeito da temperatura sobre o fator de fracionamento isotópico ($\alpha_{\text{calcita}-\text{água}}$).

A comparação entre o $\delta^{18}\text{O}_{\text{calcita}}$ medido nos experimentos e a variação da teórica calculada em função da temperatura apresenta boa consistência quanto à amplitude sazonal, o que indica que a temperatura é, de fato, o principal controlador da variabilidade sazonal do $\delta^{18}\text{O}$ do calcita dos espeleotemas. O mesmo não se pode afirmar quanto a variabilidade interanual.

Ao longo dos anos de monitoramento foi registrado uma queda gradual da temperatura em decorrência de anos mais chuvosos. A diminuição da temperatura leva ao aumento do $\delta^{18}\text{O}$ da calcita e portanto, a tendência de queda dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ entre os anos de 2018 e 2023 não pode ser explicada pela temperatura. Nesse sentido, sabe-se que a evaporação é um processo de fracionamento cinético que favorece o enriquecimento de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ durante a precipitação de carbonato, isso porque os isótopos mais leves ficam preferencialmente na fase vapor (Lachniet, 2009). O aumento da umidade relativa favorece, portanto, valores mais negativos de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$. Como é apresentado no Gráfico 16 as tendências de aumento de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$ são coerentes com o aumento da umidade relativa, o que sugere que variações do potencial evaporativo relacionados à umidade relativa do ambiente de deposição são, potencialmente, os principais controladores da variabilidade isotópica na área do experimento.

Soma-se a esse efeito a variação da composição isotópica das águas de recarga meteórica que, potencialmente, tendem a apresentar diminuição dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ com o aumento das chuvas em escala local.

7. CONCLUSÃO

Os dados produzidos pelos 5 anos de monitoramento geoquímico e hidrológico da caverna bem ventilada na região do Brasil Central, Lapa da Onça, ajudam a entender como as variações das condições atmosféricas da caverna, relacionadas à temperatura e umidade, afetam a geoquímica dos carbonatos de espeleotema e assim nos permitem identificar a influência antrópica sobre o clima.

Os resultados obtidos a partir das análises comparativas das temperaturas coletadas, mostram que a temperatura da caverna tem maior compatibilidade com as temperaturas mínimas do ambiente externo, variando entre 24,5°C e 16,2°C, e as temperaturas mais altas são observadas entre os meses de outubro e março/abril.

A umidade relativa da caverna segue semelhante em todos os pontos de monitoramento, no entanto as variações existentes são maiores nos pontos próximos à entrada e as menores variações nos pontos localizados mais no interior da gruta.

Em relação à taxa de gotejamento, as maiores taxas ocorrem entre junho e setembro, representando um atraso na resposta desse parâmetro em relação ao acumulado de chuva mensal. Esse parâmetro está diretamente relacionado com a taxa de deposição do CaCO₃. Contudo, conforme apontado nos resultados, essa relação não aparenta ser a única controladora da taxa de deposição. Por outro lado, foi registrada uma relação em fase entre as taxas de deposição com a temperatura. Essa relação pode ser explicada pelo efeito das temperaturas sobre a solubilidade do CO₂, favorecendo a supersaturação da solução em relação à calcita em condições de aumento de temperatura (Fairchild & Baker, 2012).

O experimento com os vidros-relógio demonstrou que a composição isotópica do carbonato ao longo do ano depende não apenas da disponibilidade de água de gotejamentos, mas também de parâmetros de temperatura e umidade relativa, uma vez que a umidade relativa e temperatura aceleram a evaporação. Além disso, o forte controle das variações de temperatura sobre a taxa de evaporação da água de gotejamento, favorece o enriquecimento isotópico tanto nas razões isotópicas de oxigênio como de carbono. O processo evaporativo tende assim a aumentar os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$, no período mais quente do ano, entre os meses de outubro e março/abril. Isso coincide com a baixa cobertura de nuvens e alta insolação, que resulta em temperaturas mais altas e maior taxa de evaporação.

Portanto os parâmetros ambientais de temperatura e umidade relativa mostram influenciar diretamente o comportamento deposicional do carbonato de cálcio e a isotopia de C e O impressas em espeleotemas, sendo a influência da temperatura sobre os valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ mais evidente, e a umidade relativa muito influente nos valores de $\delta^{18}\text{O}$. Os parâmetros demonstram um ciclo sazonal bem marcado, relacionado com as estações do ano e padrões de alta temperatura e umidade relativa.

Sendo assim, o estudo através do acompanhamento da deposição de carbonato de cálcio e das análises isotópicas em cavernas bem ventiladas do Brasil central permite a identificação de variações climáticas, representadas pelas anomalias de temperaturas. Além disso, os resultados apresentados contribuem na interpretação de reconstruções paleoclimáticas realizadas através de análises em espeleotemas de cavernas ventiladas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. N. O cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, 1977.
- AULT, T. R. On the essentials of drought in a changing climate. **Science**. 2020.
- BOHRER, V. **RELAÇÃO DA DINÂMICA AMBIENTAL COM A GEOQUÍMICA DE ESPELEOTEMAS DA CAVERNA ONÇA, ITACARAMBI-MG**. Brasil: Universidade de São Paulo, 2021.
- BUARQUE, P. F. **Variabilidade climática do Sistema de Monção Sul-americana no Centro-leste do Brasil durante o último milênio a partir de registros em espeleotemas e tronco de árvores**. Tese de Doutorado—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2019.
- CRUZ F.W., et al. Evidence of rainfall variations in Southern Brazil from trace element ratios (Mg/Ca and Sr/Ca) in a Late Pleistocene stalagmite. **Geochimica et Cosmochimica Acta** Volume 71, Issue 9, 1 May, 2007
- CUNHA, A. P. M. A. et al. Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. 2019.
- DAI, A.; TRENBERTH, K. E.; TAOTAO, Q. **A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming**. [s.l.] National Center for Atmospheric Research,* Boulder, Colorado, 2004.
- DARDENNE, M. A. A Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil. **Congresso Brasileiro de Geologia**, v. 30, 1978.
- DREYBRODT, W. **Evolution of the isotopic composition of carbon and oxygen in a calcite precipitating H₂O–CO₂–CaCO₃ solution and the related isotopic composition of calcite in stalagmites**. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. Volume 72, Issue 19, 1 October, 2008.
- FAIRCHILD, I. J. et al. **Modification and preservation of environmental signals in speleothems**. Massachusetts: University Distinguished Professor in the Department of Geosciences and Director of the Climate System Research Center, University of Massachusetts Amherst., 2006.
- FAIRCHILD, I. J.; BAKER, A. **Speleothem Science: From Process to Past Environments**. [s.l.] Wiley since 1807, 2012.
- FENG, W. et al. Oxygen isotope variations in rainfall, drip-water and speleothem calcite from a well-ventilated cave in Texas, USA: Assessing a new speleothem temperature proxy. **Elsevier**, v. 127, 2014.
- ICMBIO. Mastofauna da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. 2005.
- JORGETTI T.; SILVA DIAS P; FREITAS E. The relationship between South Atlantic SST and SACZ intensity and positioning. **Climate Dynamics**. jun. 2014.
- KARMANN, I. et al. **Climate influence on geochemistry parameters of waters from Santana–Pérolas cave system, Brazil**. Brasil: Universidade de São Paulo, 2007.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlagcondicionadas. **Justus Perthes**, 1928.
- LACHNIET, M. S. Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values. **Elsevier**, 2009.
- MICKLER, P. J. et al. Stable isotope variations in modern tropical speleothems: Evaluating equilibrium vs. kinetic isotope effects. **Elsevier**, v. 68, 2004.
- MOUQUET, J. et al. **Centennial-scale solar forcing of the South American Monsoon System recorded in stalagmites**. Brasil: Universidade de São Paulo, 2016.
- MOURA, M. T. T. A Dinâmica de Evolução da Paisagem do Vale do Rio Peruaçu. Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico. 2009.
- PERRIN, J. Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland. **Elsevier**, v. 279, 2003.
- PFLUG, R.; RENGER, F. Estratigrafia e evolução geológica da margem SE do Cráton Sanfranciscano. **Congresso Brasileiro de Geologia**, 1973.
- PILÓ, L. B. Caracterização regional do Vale do Rio Peruaçu. **O Carste, Belo Horizonte**, 1997.
- RABELLO, E. A.; LOPES, O. F.; COSTA, P. C. G. Geologia da região de Januária/Itacarambi. **Projeto Bambuí Norte**, 1977.

RADAMBRASIL. **Folha SD. 23 Brasília; Geologia Geomorfologia, Pedologia, Vegetação e Uso Potencial da Terra.**, 1982.

STRÍKIS, N. **Atividade do Sistema de Monção Sul-americana na porção central do Brasil durante o último período glacial a partir da aplicação de isótopos de oxigênio em espeleotemas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2015.

STRÍKIS, N. Efeitos Antrópicos sobre o Clima e a Hidrologia do Brasil Central. **Programa Jovem Cientista do Nosso Estado**, 2021.

ANEXO I

Tabela 1: Dados da taxa de gotejamento nos cinco pontos monitorados de fevereiro de 2018 a setembro de 2023 em gotejamentos ativos na caverna Gruta da Onça.

Ponto	Data (mm/dd/aa)	Tempo por gota (mm:ss.00)	Tempo por gota (seg)	Frequência (gotas/min)
P1	04/07/2018	-----	-----	0
P2	04/07/2018	00:21.11	21	2,86
P3	04/07/2018	00:19.48	19	3,16
P4	04/07/2018	00:39.41	39	1,54
P5	04/07/2018	-----	-----	0
P1	5/20/2018	01:17.38	77	0,78
P2	5/20/2018	01:05.53	66	0,91
P3	5/20/2018	00:58.96	59	1,02
P4	5/20/2018	01:26.72	87	0,69
P5	5/20/2018	-----	-----	0
P1	8/19/2018	01:39.83	100	0,6
P2	8/19/2018	01:17.47	77	0,78
P3	8/19/2018	01:00.89	61	0,98
P4	8/19/2018	01:13.16	73	0,82
P5	8/19/2018	-----	-----	0
P1	09/07/2018	01:45.54	106	0,57
P2	09/07/2018	02:20.80	141	0,43

Ponto	Data (mm/dd/aa)	Tempo por gota (mm:ss.00)	Tempo por gota (seg)	Frequência (gotas/min)
P3	09/07/2018	01:33.31	93	0,65
P4	09/07/2018	02:43.96	164	0,37
P5	09/07/2018	-----	-----	0
P1	9/29/2018	02:33.77	154	0,39
P2	9/29/2018	00:31.12	31	1,94
P3	9/29/2018	01:09.75	70	0,86
P4	9/29/2018	-----	-----	
P5	9/29/2018	-----	-----	0
P1	12/21/2018	01:28.43	88	0,68
P2	12/21/2018	01:21.24	81	0,74
P3	12/21/2018	00:47.83	48	1,25
P4	12/21/2018	00:58.19	58	1,03
P5	12/21/2018	02:01.48	121	0,5
P1	01/12/2019	01:29.07	89	0,67
P2	01/12/2019	00:25.95	26	2,31
P3	01/12/2019	01:39.76	100	0,6
P4	01/12/2019	01:46.48	106	0,57
P5	01/12/2019	06:58.77	419	0,14
P1	2/16/2019	01:03.82	64	0,94

Ponto	Data (mm/dd/aa)	Tempo por gota (mm:ss.00)	Tempo por gota (seg)	Frequência (gotas/min)
P2	2/16/2019	00:54.89	55	1,09
P3	2/16/2019	00:48.09	48	1,25
P4	2/16/2019	01:31.72	92	0,65
P5	2/16/2019	-----	-----	0
P1	4/20/2019	00:58.85	59	1,02
P2	4/20/2019	01:02.72	63	0,95
P3	4/20/2019	00:33.96	34	1,76
P4	4/20/2019	01:08.24	68	0,88
P5	4/20/2019	08:15.61	496	0,12
P1	5/19/2019	01:04.99	65	0,92
P2	5/19/2019	01:03.97	64	0,94
P3	5/19/2019	00:33.36	33	1,82
P4	5/19/2019	01:02.98	63	0,95
P5	5/19/2019	07:36.78	457	0,13
P1	6/19/2019	01:23.71	84	0,71
P2	6/19/2019	01:23.81	84	0,71
P3	6/19/2019	00:56.17	56	1,07
P4	6/19/2019	01:42.63	103	0,58
P5	6/19/2019	08:39.85	520	0,12

Ponto	Data (mm/dd/aa)	Tempo por gota (mm:ss.00)	Tempo por gota (seg)	Frequência (gotas/min)
P1	7/13/2019	01:24.46	84	0,71
P2	7/13/2019	01:44.97	105	0,57
P3	7/13/2019	00:19.85	20	3
P4	7/13/2019	01:10.73	71	0,85
P5	7/13/2019	-----	-----	0
P1	8/31/2019	02:08.42	128	0,47
P2	8/31/2019	01:59.58	120	0,5
P3	8/31/2019	00:35.09	35	1,71
P4	8/31/2019	01:15.35	75	0,8
P5	8/31/2019	-----	-----	0
P1	9/29/2019	02:10.64	131	0,46
P2	9/29/2019	00:55.57	56	1,07
P3	9/29/2019	00:40.73	41	1,46
P4	9/29/2019	01:18.67	79	0,76
P5	9/29/2019	-----	-----	0
P1	10/11/2019	05:04.32	304	0,2
P2	10/11/2019	02:14.63	135	0,44
P3	10/11/2019	00:42.26	42	1,43
P4	10/11/2019	03:02.67	183	0,33

Ponto	Data (mm/dd/aa)	Tempo por gota (mm:ss.00)	Tempo por gota (seg)	Frequência (gotas/min)
P5	10/11/2019	-----	-----	0
P1	6/24/2021	01:24.41	84	0,71
P2	6/24/2021	02:06.48	126	0,48
P3	6/24/2021	01:03.91	64	0,94
P4	6/24/2021	01:18.93	79	0,76
P5	6/24/2021			
P1	08/09/2021	01:42.55	103	0,58
P2	08/09/2021	01:24.87	85	0,71
P3	08/09/2021	00:54.13	54	1,11
P4	08/09/2021	02:32.00	152	0,39
P5	08/09/2021	08:56.91	537	0,11
P1	09/09/2021	02:37.20	157	0,38
P2	09/09/2021	01:51.91	112	0,54
P3	09/09/2021	00:49.33	49	1,22
P4	09/09/2021	01:44.06	104	0,58
P5	09/09/2021	12:29.01	749	0,08
P1	11/03/2021	01:36.3	96	0,63
P2	11/03/2021	00:30.4	30	2
P3	11/03/2021	01:07.7	68	0,88

Ponto	Data (mm/dd/aa)	Tempo por gota (mm:ss.00)	Tempo por gota (seg)	Frequência (gotas/min)
P4	11/03/2021	00:46.2	46	1,3
P5	11/03/2021	09:30.0	570	0,11
P1	12/30/2021	01:36.5	97	0,62
P2	12/30/2021	01:54.7	115	0,52
P3	12/30/2021	01:33.6	94	0,64
P4	12/30/2021	00:59.9	60	1
P5	12/30/2021	01:59.6	120	0,5
P1	1/30/2022	01:04.5	65	0,92
P2	1/30/2022	00:53.4	53	1,13
P3	1/30/2022	01:04.6	65	0,92
P4	1/30/2022	00:40.6	41	1,46
P5	1/30/2022	01:39.0	99	0,61
P1	03/12/2022	00:57.3	57	1,05
P2	03/12/2022	00:33.2	33	1,82
P3	03/12/2022	01:17.1	77	0,78
P4	03/12/2022	00:54.9	55	1,09
P5	03/12/2022	01:13.4	73	0,82
P1	04/02/2022	01:09.1	69	0,87
P2	04/02/2022	01:02.9	63	0,95

Ponto	Data (mm/dd/aa)	Tempo por gota (mm:ss.00)	Tempo por gota (seg)	Frequência (gotas/min)
P3	04/02/2022	00:51.2	51	1,18
P4	04/02/2022	00:43.6	44	1,36
P5	04/02/2022	00:53.8	54	1,11
P1	05/02/2022	01:09.1	69	0,87
P2	05/02/2022	01:02.6	63	0,95
P3	05/02/2022	00:51.0	51	1,18
P4	05/02/2022	00:42.6	43	1,4
P5	05/02/2022	00:52.8	53	1,13
P1	06/09/2022	00:01:24	84	0,71
P2	06/09/2022	00:54.8	55	1,09
P3	06/09/2022	01:04.4	64	0,94
P4	06/09/2022	00:38.6	39	1,54
P5	06/09/2022	01:26.1	86	0,7
P1	07/02/2022	01:18.7	79	0,76
P2	07/02/2022	01:35.9	96	0,63
P3	07/02/2022	00:49.4	49	1,22
P4	07/02/2022	00:56.3	56	1,07
P5	07/02/2022	01:29.7	90	0,67
P1	08/04/2022	01:20.0	80	0,75

Ponto	Data (mm/dd/aa)	Tempo por gota (mm:ss.00)	Tempo por gota (seg)	Frequência (gotas/min)
P2	08/04/2022	01:16.7	77	0,78
P3	08/04/2022	01:18.4	78	0,77
P4	08/04/2022	00:40.8	41	1,46
P5	08/04/2022	02:03.1	123	0,49
P1	09/04/2022	01:18.6	79	0,76
P2	09/04/2022	01:33.5	94	0,64
P3	09/04/2022	02:44.2	164	0,37
P4	09/04/2022	00:52.6	53	1,13
P5	09/04/2022	01:46.7	107	0,56
P1	9/27/2022	01:26.8	87	0,69
P2	9/27/2022	01:18.9	79	0,76
P3	9/27/2022	01:19.7	80	0,75
P4	9/27/2022	00:38.5	39	1,54
P5	9/27/2022	01:32.9	93	0,65
P1	11/05/2022	01:46.8	107	0,56
P2	11/05/2022	00:58.7	59	1,02
P3	11/05/2022	01:58.4	118	0,51
P4	11/05/2022	00:39.4	39	1,54
P5	11/05/2022	02:16.7	137	0,44

Ponto	Data (mm/dd/aa)	Tempo por gota (mm:ss.00)	Tempo por gota (seg)	Frequência (gotas/min)
P1	12/04/2022	01:40.2	100	0,6
P2	12/04/2022	01:12.6	73	0,82
P3	12/04/2022	01:28.6	89	0,67
P4	12/04/2022	00:34.6	35	1,71
P5	12/04/2022	01:55.1	115	0,52
P1	01/03/2023	01:17.3	77	0,78
P2	01/03/2023	01:48.3	108	0,56
P3	01/03/2023	01:18.2	78	0,77
P4	01/03/2023	00:35.2	35	1,71
P5	01/03/2023	01:51.7	112	0,54
P1	02/05/2023	01:18.4	78	0,77
P2	02/05/2023	01:19.3	79	0,76
P3	02/05/2023	01:42.4	102	0,59
P4	02/05/2023	00:29.8	30	2
P5	02/05/2023	01:50.5	110	0,55
P1	03/05/2023	01:22.1	82	0,73
P2	03/05/2023	01:23.3	83	0,72
P3	03/05/2023	01:08.2	68	0,88
P4	03/05/2023	00:30.0	30	2

Ponto	Data (mm/dd/aa)	Tempo por gota (mm:ss.00)	Tempo por gota (seg)	Frequência (gotas/min)
P5	03/05/2023	01:44.1	104	0,58
P1	04/07/2023	01:22.2	82	0,73
P2	04/07/2023	01:23.5	83	0,72
P3	04/07/2023	01:08.3	68	0,88
P4	04/07/2023	00:28.1	28	2,14
P5	04/07/2023	01:44.7	105	0,57
P1	06/10/2023	01:19.5	79	0,76
P2	06/10/2023	01:09.9	70	0,86
P3	06/10/2023	01:06.0	66	0,91
P4	06/10/2023	00:26.9	27	2,22
P5	06/10/2023	01:37.0	97	0,62
P1	09/08/2023	01:24.7	85	0,71
P2	09/08/2023	01:39.6	100	0,6
P3	09/08/2023	01:05.6	66	0,91
P4	09/08/2023	00:51.4	51	1,18
P5	09/08/2023	02:05.6	126	0,48

Tabela 2: Dados da taxa de deposição de carbonato de cálcio monitorados de Fevereiro de 2018 a Setembro de 2023 em gotejamentos ativos na caverna Gruta da Onça.

Data Instalação	Data Média	Data Remoção	Tx Dep (z-score)				
			P1	P2	P3	P4	P5
02/20/18	03/15/18	04/07/18	0.57	-0.02	0.29	-0.31	-0.56
04/07/18	04/28/18	05/20/18	-0.05	2.93	-0.58	0.08	-0.56
05/20/18	07/04/18	08/19/18	-0.33	0.11	-1.11	-0.43	-0.79
08/19/18	08/28/18	09/07/18	-0.27	-0.51	-1.61	-0.70	-0.81
09/07/18	09/18/18	09/29/18	-0.40	-0.52	-1.41	-0.57	-0.84
09/29/18	11/09/18	12/21/18	-0.07	-0.57	-0.08	-0.36	-0.56
12/21/18	01/18/19	02/16/19	0.15	-0.04	0.50	-0.23	-0.22
02/16/19	03/19/19	04/20/19	-0.31	0.26	0.56	-0.16	-0.27
04/20/19	05/04/19	05/19/19	-0.25	0.03	0.63	-0.37	-0.37
05/19/19	06/15/19	07/13/19	-0.37	0.18	0.76	-0.41	-0.43
07/13/19	08/06/19	08/31/19	-0.64	0.16	0.38	-0.38	-0.74
08/31/19	09/14/19	09/29/19	-0.57	0.01	0.19	-0.42	-0.78
09/29/19	10/20/19	11/10/19	-0.26	0.17	1.49	-0.10	-0.64
08/09/21	08/24/21	09/09/21					
09/09/21	10/06/21	11/03/21					
11/03/21	12/01/21	12/30/21	0.82	-0.18	0.08	0.04	0.49
12/30/21	01/14/22	01/30/22	1.23	-0.50	-0.90	0.17	0.82
01/30/22	03/02/22	04/02/22	-0.18	-0.61	-1.40	-0.46	-0.12
04/02/22	04/17/22	05/02/22	0.16	-0.74	-1.01	-0.35	0.21
05/02/22	05/21/22	06/09/22	-0.60	-0.29	-0.94	2.62	0.36
06/09/22	06/20/22	07/02/22	-1.29	-1.17	-1.82	-1.14	0.53
07/02/22	07/18/22	08/04/22	-1.54	-0.99	0.67	-1.18	0.76
08/04/22	08/31/22	09/27/22	-1.47	-1.10	-1.57	-1.07	-0.61
09/27/22	10/16/22	11/05/22	-1.6	0.20	-0.40	0.60	0.20
11/05/22	11/19/22	12/04/22		-0.50	-0.50	0.00	-0.20
12/04/22	12/19/22	01/03/23	1.20	-0.80	1.30	-0.20	3.80
01/03/23	01/19/23	02/05/23		-1.20	3.10	2.90	2.50
02/05/23	02/19/23	03/05/23	1.70	0.50	1.70	1.80	1.50
03/05/23	03/21/23	04/07/23	2.40	2.20	-0.20	2.00	0.40
04/07/23	05/09/23	06/10/23	-0.20	-0.70	-0.70	-0.80	-0.10
06/10/23	07/10/23	08/09/23	0.90	1.20	0.80	1.50	0.50