Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbge

Precipitação no sul do Brasil e sua relação com dados paleoclimáticos

Vaneza Barreto Pereira¹, Eder Bayer Maier², Jefferson Cardia Simões³

¹ Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, prédio 43136, sala 208 - CEP 91501-970, Porto Alegre, RS. vaneza1970@hotmail.com (autor correspondente). ² Professor, Departamento de Geografia, Instituto de Ciências Humanas e da Informação, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS. edermaier@gmail.com. ³ Professor Associado, Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, prédio 43136, sala 209 - CEP 91501-970, Porto Alegre, RS. jefferson.simoes@ufrgs.br.

Artigo recebido em 22/06/2016 e aceito em 14/09/2016

RESUMO

A paleoclimatologia estuda as condições climáticas que afetam o planeta em épocas anteriores à adoção de observações e registros sistemáticos e instrumentais, e para isso utiliza-se de registros paleoclimáticos encontrados na natureza. Através do estudo desses registros, é possível reconstruir as condições climáticas do passado em grandes escalas de tempo desta forma permitindo visualizar ciclos e padrões, que servem de base para projetar tendências de condições climáticas futuras, bem como anomalias. Esse estudo tem como objetivo comparar a variabilidade dos Isótopos Estáveis de ¹⁸O registrados em um testemunho de gelo do Nevado Illimani, Bolívia, com as anomalias de precipitação na região Sul do Brasil. Para isso será necessário: (i) identificar padrões temporais da precipitação no Sul do Brasil; (ii) correlacionar os padrões de precipitação da região sul do Brasil com a variabilidade da razão isotópica de Oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) registrada no testemunho de gelo do Nevado Illimani, (iii) analisar a possibilidade de estimar a precipitação pretérita usando o $\delta^{18}\text{O}$. Os resultados encontrados mostram uma baixa correlação entre a variação dos isótopos de ¹⁸O do testemunho de gelo do Nevado Illimani com a variação temporal da precipitação no sul do Brasil. Fatores que controlam a variação do registro isotópico como localização da área fonte de umidade, efeito continentalidade, efeito altitude, efeito sazonalidade bem como os sistemas atmosféricos atuantes na região sul do Brasil explicam essa baixa correlação.

Palavras-chave: clima, glacioquímica, isótopos estáveis.

Rainfall in southern Brazil and its relationship with paleoclimatic data

ABSTRACT

The paleoclimatology studies the climatic conditions that affect the planet in earlier times to the adoption of observations and systematic and instrumental records, and it makes use of paleoclimatic records found in nature. Through the study of these records, it is possible to reconstruct the climate of the past conditions on large scales of time thus allowing you to see cycles and patterns, which are the basis for designing trends of future climate conditions and anomalies. This study aims to compare the variability of Stable Isotope ¹⁸O recorded in an ice core from Nevado Illimani, Bolívia, with precipitation anomalies in southern Brazil. This will require: (i) identify temporal patterns of rainfall in southern Brazil; (ii) correlating the southern region rainfall patterns in Brazil with the variability of the isotopic ratio of oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) recorded in ice core from Nevado Illimani, (iii) examine the possibility of estimating the preterit precipitation using $\delta^{18}\text{O}$. The results show a low correlation between the variation of the ¹⁸O isotope of ice core from Nevado Illimani with the temporal variation of rainfall in southern Brazil. Factors that control the variation of the isotopic record as location of the moisture source area, continentality effect, altitude effect, seasonality effect and atmospheric systems active in southern Brazil explain this low correlation.

Keywords: climate, glaciochemistry, stable isotopes.

Introdução

Comparando uma série temporal de razão isotópica de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) de um testemunho de gelo obtido na Bolívia com dados da precipitação sobre a América do Sul foram identificadas relações espaço-temporais no período 1979–2008

que podem ser usadas para reconstrução paleoclimática (Maier, 2014).

Em junho de 1999 uma equipe franco-suíça extraiu um núcleo de gelo do Nevado Illimani (6.350 m, 16°37'S, 67°46'W) de 136,7 m, onde a parte mais profunda contém gelo composto por

precipitações de neve que datam do final do Último Máximo Glacial, cerca de 18 mil anos atrás, e os primeiros 50 metros foram formados por precipitações ocorridas no último século (Ramirez *et. al.*, 2003).

Nas altas latitudes, a composição isotópica da água meteórica é interpretada como um indicador de temperatura. Já nas latitudes mais baixas, é a precipitação que domina o sinal (Dansgaard, 1964; Rozansk *et. al.*, 1993)

A série temporal do $\delta^{18}\text{O}$ do Nevado Illimani guarda informações pretéritas do ciclo hidrológico, porque a neve que precipita nessa geleira evapora no Oceano Atlântico e recicla sobre o continente sul-americano (Vimeux *et. al.*, 2005). As variações do $\delta^{18}\text{O}$ em latitudes tropicais ocorrem pelo fracionamento isotópico em cada processo de condensação da água na atmosfera, ou seja, a repetição desse processo ao longo da reciclagem da água sobre o continente diminui a porcentagem relativa do O^{18} (Dansgaard, 1964). Devido as suas características físico-geográficas, a região que se localiza o nevado Illimani recebe influência dos processos atmosféricos que ocorrem tanto na baixa troposfera, como na alta troposfera, como por exemplo, a Zona de Convergência Intertropical, os ventos alísios, as Linhas de Instabilidade, os Sistemas Convectivos, os Jatos de Baixos Níveis (Baixa Troposfera) e Alta da Bolívia (Alta troposfera), bem como os processos que atuam sobre a região amazônica, devido a sua proximidade com a floresta (Simões *et. al.*, 2003).

Na América do Sul, a sazonalidade dos ventos influencia nas proporções da reciclagem e recarga de água, pois a circulação atmosférica monçônica é um mecanismo eficiente de transporte da umidade evaporada no oceano Atlântico durante o verão e perde eficiência durante o inverno (Nóbrega *et. al.*, 2005).

A região sul do Brasil tem precipitação bem distribuída ao longo do ano (Rao e Hada, 1990) e com totais pluviométricos elevados: 1050-1750 mm/ano.

Reboita *et. al.*, 2010 apresentou um estudo sobre os regimes de precipitação na América do Sul, e para isso regionalizou o continente em 8 setores de acordo com os ciclos anuais de precipitação que cada região apresenta. Para o sul do Brasil, a precipitação está associada com: 1) sistemas frontais que se deslocam do Pacífico, passam pela Argentina e seguem para o nordeste do Brasil (Kousky, 1979; Oliveira, 1986; Rodrigues *et. al.*, 2004; Andrade, 2007); 2) ciclones e frentes frias que se desenvolvem nesta região devido à presença de vórtices ciclônicos ou cavados em altos níveis sobre a costa oeste da América do Sul vindos do Pacífico (Miky Funatsu *et. al.*, 2004,

Iwabe e Da Rocha, 2009), e também devido a condições frontogenéticas e/ou ciclogênicas originadas na própria região (Satyamurty e Mattos, 1989; Reboita *et. al.*, 2009); 3) CCMs (Salio *et. al.* 2007); 4) sistemas ciclônicos em níveis médios conhecidos como vírgula invertida (Bonatti e Rao, 1987; Hallak, 2000) e 5) bloqueios atmosféricos (Marques e Rao, 1999 e 2000; Nascimento e Ambrizzi, 2002).

Analisar os mecanismos que são responsáveis pelas condições climáticas que atuam na América do Sul é fundamental para entender as conexões que ocorrem entre regiões distantes, como por exemplo, o objeto deste estudo que é encontrar a relação entre os registros paleoclimáticos em um testemunho de gelo de um nevado em uma geleira tropical e a precipitação no sul do Brasil, em uma região subtropical.

Os testemunhos de gelo são os melhores registros da variação climática global ou regional, porque eles preservam informações sobre o balanço térmico-hídrico com alta resolução temporal (Thompson, 1993). Adicionalmente, a precipitação é uma variável climática de suma importância, porque a água no sistema ambiental é um regulador térmico e controlador da biodiversidade.

Os processos Atmosféricos que são responsáveis pelo possível transporte de umidade que passa pelo leste dos Andes em direção ao Sul do Brasil, são: 1) a deflexão dos ventos alísios que cruzam a bacia Amazônica; 2) um fator puramente local, topograficamente gerado, dirigido pela dinâmica seca, mas possivelmente modificado pela convecção úmida no lado leste dos Andes; 3) um fator forçado externamente e associado com variações dos sistemas transientes nos ventos de oeste que cruzam o norte da Argentina e 4) propagação de perturbações no campo de vento em baixos níveis do Atlântico Norte em direção à bacia do Prata através da bacia Amazônica (Vera *et. al.* 2006)

No Brasil existem poucas investigações que relacionam os registros paleoclimáticos com variáveis climáticas da América do Sul. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi de identificar a existência de correlação entre a variabilidade da razão de isótopos de oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) registrada no testemunho de gelo do Nevado Illimani com a variabilidade temporal e espacial da precipitação no Sul do Brasil utilizando séries históricas de precipitação, (1929 – 1998) disponibilizados pela Agência Nacional das Águas, bem como dados modelados, disponibilizados pela Universidade de Delaware.

Nesse sentido, este trabalho pode colaborar com os esforços de avançar em temas

mundialmente reconhecidos como fundamentais para a compreensão das variações climáticas nos últimos séculos.

Área de estudo

Região Sul do Brasil (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul)

O clima do Sul do Brasil apresenta grandes contrastes nos regimes de precipitação e temperatura. Parte deles deve-se a situação geográfica da região, na transição entre os trópicos e as latitudes médias, e o relevo acidentado também contribuem para esses contrastes (Grimm, 2009).

O regime de precipitação do Sul do Brasil apresenta transição bem clara: ao norte domina o típico regime de monção, com estação chuvosa iniciando-se na primavera e terminando no início do outono, resultando em grande diferença de precipitação entre verão e inverno, enquanto ao sul há distribuição aproximadamente uniforme de chuva ao longo do ano e o regime é mais característico de latitudes médias, com chuvas relativamente mais fortes no inverno. Efeitos topográficos também são notáveis, e as maiores precipitações da região associam-se à ascensão sobre a barreira topográfica (Grimm, 2009).

A situação geográfica da região Sul, nos subtrópicos, garante a maior amplitude do ciclo

anual de temperatura no Brasil, com maior contraste entre o inverno e o verão. Além disso, o planalto meridional e as serras produzem contrastes marcantes na distribuição de temperaturas, sendo esta a única região do Brasil com precipitação em forma de neve (Grimm, 2009)

Nevado Illimani

O Nevado Illimani é um cone vulcânico situado na face oriental da região central da cordilheira dos Andes (Figura 1) em território boliviano, a cerca de 40 quilômetros de La Paz. Em seu cume, em torno de 6350 m de altitude, há cobertura de gelo formada pelo acúmulo de neve que se origina a três mil quilômetros de distância, no Oceano Atlântico. A parte mais profunda contém gelo composto por precipitações de neve do final do Último Máximo Glacial, cerca de 18 mil anos atrás e os primeiros 50m foram formados por precipitações ocorridas no último século (Ramirez *et. al.*, 2003).

No trabalho de Reboita *et. al.* (2010), a região onde se localiza o Nevado Illimani apresenta maiores totais pluviométricos nos meses de verão e menores nos de inverno. Embora o ciclo anual de precipitação dessa região seja similar ao da região central do Brasil, seus totais pluviométricos são inferiores.

Figura 1. (a) Mapa de localização do Nevado Illimani, Bolívia e (b) Vista parcial do Nevado Illimani. Fontes: Imagem obtida no Google Earth e <http://www.bolivian.com/lapaz/illimani-5.html> acessado em 12/04/2016.

Garreaud e Wallace (1997) observaram que no verão há grande atividade convectiva devido ao efeito do levantamento orográfico do ar úmido (proveniente da bacia Amazônica) no setor leste dos Andes (Lenters e Cook, 1995). Ainda, segundo Garreaud e Wallace (1997), a crista dos Andes não apresenta convecção durante o final da noite e início da manhã, porém a cobertura de nuvens aumenta rapidamente das 03h00min às 11h00min hora local (HL), atinge um máximo às 18h00min HL que é seguido por um decréscimo até às 24h00min HL. De acordo com Aceituno *et. al.* (1994), a convecção no altiplano andino é provavelmente relacionada com o ciclo diurno pronunciado nas condições termodinâmicas.

Em relação ao transporte de umidade desta região para a região Sul do Brasil, os complexos convectivos de mesoescala (CCMs; Velasco e Fritsch, 1987; Salio *et. al.*, 2007), contribuem para as elevadas taxas de precipitação na primavera e verão. Os CCMs são conjuntos de cumulonimbus acompanhados por densa camada de cirrus, que podem ser facilmente identificados em imagens de satélites como sendo sistemas de nuvens com aparência aproximadamente circular e com um crescimento explosivo num intervalo de tempo de 6 a 12 horas (Silva Dias, 1987).

De acordo com Velasco e Fritsch (1987), o elemento principal para a formação dos CCMs nos extratropicais da AS é a presença de um jato em baixos níveis (JBN) de norte, com máxima velocidade em torno de 850 hPa, o qual proporciona forte advecção de ar quente e úmido.

Além disso, há a presença de um jato de oeste em altos níveis, localizado por volta de 5° ao sul da posição do CCM. Este jato é importante, pois tem uma circulação transversal na sua entrada, cuja componente ageostrofica favorece divergência de massa (no setor noroeste da entrada do jato) em altos níveis e convergência em baixos níveis, e esta convergência acoplada com a do JBN contribui para a intensificação da convergência de umidade na região do CCM.

Na AS, o JBN importante para o desenvolvimento de CCMs nos extratropicais é o que se localiza a leste dos Andes, e transporta ar quente e úmido da região amazônica para o sudeste da AS (Marengo *et. al.*, 2004; Vera *et. al.*, 2006).

Material e métodos

A metodologia proposta tem como objetivo relacionar as amostras espaço-temporal da precipitação na região sul do Brasil com a série temporal do $\delta^{18}\text{O}$ do testemunho de gelo do Nevado Illimani;

Dados

Razão Isotópica do Oxigênio Dezoito ($\delta^{18}\text{O}$)

A série do $\delta^{18}\text{O}$ tem origem na análise das amostras do testemunho de gelo recuperado no Nevado Illimani (16°37' S, 67°46' W e 6350 m), o qual se situa na cordilheira Oriental dos Andes, na Bolívia, próximo da capital La Paz e do Lago Titica. Este nevado distingue-se das demais geleiras desta porção da cordilheira porque recebe umidade proveniente da bacia Amazônica. Neste trabalho serão usados dados dos primeiros 50 m do testemunho de gelo, que se originaram do acúmulo de neve precipitada entre o período 1929–1998 (Ramirez *et. al.*, 2003). Para saber mais detalhes sobre a técnica de mensuração adotada ver Ramirez *et. al.*, 2003.

Precipitação

Utilizou-se dados de precipitação mensais de séries históricas de 70 anos (1929–1998) da precipitação observada em estações meteorológicas da região sul do Brasil (Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul) mantidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Agência Nacional das Águas (ANA) (Figura 3), como também dados modelados pela Universidade Delaware disponíveis em http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.U_Del_AirT_Precip.html. Essa base compila observações da rede global de climatologia histórica e interpola esses dados em uma grade de 0,5° de latitude e longitude (Matsuura e Willmott, 2009).

Foi feito o download das estações meteorológicas pluviométricas que continham no mínimo 360 registros, o que equivale a 360 meses (30 anos). Para o Rio Grande do Sul, foram listadas 935 estações pluviométricas, das quais 132 continham dados íntegros de no mínimo 360 meses. Para Santa Catarina e Paraná, foram listados 784 e 1456 estações respectivamente, sendo que foram selecionadas 66 (SC) e 153 (PR) estações para a realização da análise. Das estações selecionadas, foram escolhidas aquelas que continham séries de dados observados no intervalo de tempo entre 1929 a 1998 (70 anos). Foram encontradas 10 estações em cada estado, totalizando 30 estações contendo séries longas de 70 anos. Destas, 15 apresentaram baixa correlação. As demais não apresentaram correlação.

O quadro 1 a seguir apresenta as estações selecionadas por Estado.

Quadro 1. Estações Meteorológicas utilizadas

Estado	Município – Lat/Long
Rio Grande do Sul	Bagé -31°18'17"/-54°7'11"
	Santa Vitória do Palmar -33°31'57"/-53°20'58"
	Bento Gonçalves -29°9'0"/-51°31'0"
	Torres -29°20'41"/-49°43'41"
	Uruguaiana -29°45'0"/-57°5'0"
	Caxias do Sul -29°11'39"/-51°11'9"
	Dom Pedrito -30°58'41"/-54°40'33"
	Encruzilhada do Sul -30°32'37"/-52°31'25"
	Passo Fundo -28°13'33"/-52°24'12"
Santa Catarina	Santa Maria -29°43'27"/-53°43'12"
	Pomerode -26°44'12"/-49°10'13"
	Timbó -26°49'47"/-49°16'19"
	Taio -27°6'47"/-49°59'40"
	Ibirama -27°3'14"/-49°31'0"
	Joinville -26°19'18"/-48°50'57"
	São Ludgero -28°19'3"/-49°10'45"
	Ilhota -26°55'18"/-48°50'2"
	Rio do Pouso -28°25'11"/-49°6'25"
Paraná	Órleans -28°21'32"/-49°17'42"
	Campos Novos -27°36'23"/-51°19'32"
	Rio Negro -26°6'0"/-49°48'0"
	Paranaguá -25°31'0"/-48°31'0"
	São Mateus -25°52'32"/-50°2'22"
	Prudentópolis -25°14'14"/-50°57'39"
	Castro -24°47'0"/-50°0'0"
	Curitiba -25°26'0"/-49°16'0"
	Ivaí -25°1'10"/-50°51'0"
	Palmas -26°29'0"/-51°59'0"
	Tomazina -23°46'0"/-49°57'0"
	União da Vitória -26°13'41"/-51°4'49"

Técnicas Estatísticas

Primeiramente foram calculadas as médias mensais da precipitação de cada estação meteorológica ao longo do período proposto (1929 – 1998). Após obter esse resultado, foram calculados as anomalias de cada mês, que é a diferença entre o registro e a média mensal. Dessa forma, as variações espaço-temporal causadas por fenômenos anômalos são maximizadas, o que facilita a identificação e interpretação dos fatores que influenciam a precipitação. Após, as séries foram subdivididas sazonalmente em: (i) Verão (dez-jan-fev); (ii) Outono (mar-abr-mai); (iii) Inverno (jun-jul-ago) e (iv) Primavera (set-out-nov). A análise sazonal apresentou importante contribuição, visto que a precipitação na região sul do Brasil não está associada somente com a

umidade trazida do norte do continente. O quadro 2 apresenta as estações meteorológicas utilizadas subdivididas de forma sazonal:

Quadro 2. Estações meteorológicas utilizadas por estação sazonal.

Estação do Ano	Estação Meteorológica
Verão	Dom Pedrito/RS
	Passo Fundo/RS
	Ilhota Jusante/SC
	Curitiba/PR
	Ivaí/PR
	Tomazina/PR
Outono	Uruguaiana/RS
	Dom Pedrito/RS
	Encruzilhada do Sul/RS
	Passo Fundo/RS
	Santa Maria/RS
	Campos Novos/SC
Inverno	Ivaí/PR
	Ilhota Jusante/PR
	Palmas/PR
Primavera	Tomazina/PR
	Caxias do Sul/RS
	Órleans/SC
	Ivaí/PR
	União da Vitória/PR

Para relacionar as informações da série de $\delta^{18}\text{O}$ com a série de anomalias de precipitação na região Sul do Brasil, utilizou-se o software MatLab. Neste software, foram gerados gráficos de dispersão, gráficos de correlação e erro.

Para determinar o grau de correlação entre as variáveis, foi utilizado o Coeficiente de Correlação de Pearson, cuja fórmula segue abaixo:

$$r = \frac{\left[\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n} \right]}{\sqrt{\left[\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right] \times \left[\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \right]}}$$

onde x é a série temporal dos isótopos de ^{18}O ; y é as estações meteorológicas e n o número de meses (840).

A análise de dependência foi utilizada para investigar a possibilidade de estimar a precipitação pretérita na região Sul do Brasil utilizando dados do $\delta^{18}\text{O}$ do Nevado Illimani. A sobreposição temporal das duas amostras ocorre no período 1929–1998. Essa análise possuiu quatro fases sequenciais, tais como: 1) elaboração dos

diagramas de dispersão; 2) identificação das equações matemáticas de regressão; 3) mensuração do erro e 4) avaliação da confiabilidade das estimativas por regressão (Lattin et al., 2011).

Os diagramas de dispersão são representações gráficas da variável independente ($\delta^{18}\text{O}$) no eixo horizontal X e da variável dependente (precipitação) no eixo vertical Y. Desta maneira, torna-se possível visualizar o grau de dependência das variáveis segundo a magnitude das amostras, assim como o melhor ajuste da equação matemática de regressão (Eq. 2). Essas equações foram identificadas no aplicativo ajuste de curva (*curve fitting* – em inglês) do programa Matlab. Além disso, foram calculadas a regressão linear e a diferença entre a estimativa e o valor real da variável dependente (erro):

$$\text{Regressão Linear: } y = p_1 * X + p_2$$

onde p_1 é o fator de multiplicação e p_2 o fator de adição.

Esse conjunto de informações formado pelo diagrama de dispersão, pela regressão linear e pela magnitude do erro possibilita avaliar a confiabilidade das estimativas por regressão, porque é testado a dependência da variável dependente (precipitação) quando comparada aquela independente ($\delta^{18}\text{O}$). Assim como, torna-se

possível avaliar o ajuste da equação matemática de regressão, verificando se o mesmo foi suficiente para compensar as diferenças entre as variáveis (Lattin et al., 2011).

Em primeira análise, mensurou-se a correlação de todas as séries temporais da precipitação com a série do $\delta^{18}\text{O}$, elaborando-se gráficos de dispersão, que não geraram resultados satisfatórios. Na sequência, operacionalizou-se a mesma técnica para analisar as séries fracionadas, isto é, de acordo com as estações sazonais. Além disso, as séries temporais da precipitação foram filtradas com o uso da média móvel de 3 a 12 meses, sendo selecionada a série filtrada com maior correlação com o $\delta^{18}\text{O}$.

Resultados e discussão

Caracterização dos padrões temporais de precipitação e do $\delta^{18}\text{O}$

Precipitação

As médias de precipitação sazonal das 30 estações meteorológicas observadas ao longo da série temporal (1929-1998) mostram que os maiores valores médios foram registrados no verão (194,48 mm), seguido pela primavera (155,63 mm), outono (131,25 mm) e inverno (131,25). Figura 2.

Figura 2. Série de médias mensais de precipitação no período 1929 – 1998 das estações meteorológicas.

A Estação localizada na lat/long - 26°55'18\"/>

Forte), agosto de 1961 (ano normal) e julho de 1964 (La Niña moderado).

Grimm et. al. 1998 detalha o ciclo anual de precipitação na região Sul. Segundo esses autores, há uma transição entre dois regimes adjacentes: monções de verão ao norte e máximos de inverno em latitudes médias, sendo os responsáveis pelos máximos de precipitação em janeiro e julho respectivamente. O regime de chuvas no verão associado ao sistema de monção sul americano é visível no norte da região, enquanto mais ao sul há máximos de precipitação em diferentes épocas do ano, indicando que além da monção, há outros mecanismos que produzem chuvas bem distribuídas ao longo de todo o ano.

Quadro 3. Estações Meteorológicas x Anomalia.

Local	Anomalia	
	Negativa (seca)	Positiva (chuvas)
Uruguaiana	-145,45	372,14
Caxias	-139,71	295,01
Dom Pedrito	-126,49	419,89
Encruzilhada	-142,68	430,45
Passo Fundo	-152,95	376,66
Santa Maria	-143,30	471,93
Ilhota	-151,83	408,71
Orleans	-155,75	537,90
Campos Novos	-170,06	559,14
Castro	-134,81	321,31
Curitiba	-172,29	280,60
Ivaí	-179,94	328,44
Palmas	-217,8	716,26
Tomazina	-197,44	410,81
União da Vitória	-140,18	612,36

Anomalias

Em relação às anomalias de precipitação, as anomalias positivas indicam chuva acima da média, e negativas indicam seca. A estação que apresentou maior amplitude nos valores de anomalia, foi a estação localizada na lat/long -26°29'0"/-51°59'0" (Palmas PR), variando entre -217 mm a 716 mm. Essa estação apresentou os extremos de anomalia, tanto positiva (716 mm em fevereiro de 1946, verão) quanto negativa (-217 mm em setembro de 1944, primavera). A Figura 3 mostra que para essas datas (Fev/1946 e Set/1944) foi registrado um El Niño moderado e um ano normal, sem anomalia, respectivamente. O menor valor da anomalia positiva encontrada foi na estação localizada na lat/long -25°26'0"/-49°16'0" (Curitiba, PR com 280 mm em janeiro de 1995, verão). Quanto a anomalia negativa, o maior valor encontrado foi na estação localizada na lat/long -30°58'41"/-54°40'33" (Dom Pedrito, RS com -126,49 mm em abril 1934, outono) e o menor, como mencionado acima, em Palmas, PR(-217 mm).O quadro 3 apresenta os valores das anomalias por estação meteorológica.

Figura 3. Série de anomalia de precipitação localizado na Lat/Long -26°29'0"/-51°59'0" (Palmas, PR) sobreposto com a série de isótopos de ^{18}O no período 1929 a 1998, indicando os anos El Niño, La Niña e anos Normais.

Série de isótopos estáveis ($\delta^{18}\text{O}$)

Os valores do $\delta^{18}\text{O}$ para o período no Illimani (média -17.77‰) variam entre -9‰ a -25‰ (Figura 4) (Ramirez *et. al.*, 2003). Os menores valores dessa amplitude indicam que o

fracionamento ocorreu porque a água que evapora no oceano atlântico (início do processo de fracionamento) passou por vários processos de evaporação-precipitação ao longo de sua trajetória. Já os valores maiores (-9‰) indicam que a água

que evaporou na área fonte não passou tantas vezes por esse processo de reciclagem (evaporação-precipitação), contendo então mais O pesado (O^{18})

em sua composição. De acordo com Dangaard (1964), cada processo de reciclagem diminui o $\delta^{18}O$ em -3‰.

Figura 4. Variação da razão isotópica do oxigênio dezoito ($\delta^{18}O$) no testemunho do Nevado Illimani. Fonte: Maier (2014).

Ao comparar a variação do $\delta^{18}O$ com a variabilidade temporal da precipitação no Sul do Brasil para o período (1929 – 1998), constatou-se que os registros de máximo (mínimo) fracionamento isotópico apresentaram correlação muito baixa, com valores inferiores a 0.5.

Diversos fatores podem ajudar a explicar a variabilidade temporal da série de $\delta^{18}O$. A precipitação no Nevado Illimani ocorre geralmente durante o verão austral (DJF), tendo como principal área fonte de umidade o oceano atlântico equatorial. Essa umidade é transportada para o interior do continente pela ação dos ventos alísios que sopram no sentido leste – oeste. Inicia-se então um processo de reciclagem da água que evapora no oceano atlântico equatorial (evaporação – precipitação) sobre a bacia amazônica. O fracionamento isotópico da água que evaporou na área fonte ocorre dessa forma, sendo que a cada processo de reciclagem há a depleção do O^{18} mais pesado e menos abundante na molécula da água. Esse é o chamado “efeito continentalidade” (Vuille *et al.*, 2003) Associado a esse efeito, há “o efeito altitude” que acontece quando o vapor de água encontra um obstáculo (barreira orográfica) e sofre um resfriamento adiabático e ocorre precipitações associadas com essas massas de ar ascendentes contribuindo ainda mais para o esgotamento do ^{18}O . O “efeito sazonalidade”, ou seja, a quantidade de chuvas na região também influencia a precipitação, e por sua vez a variação do $\delta^{18}O$, uma vez que no verão do HS as chuvas nessa região são mais abundantes. Hoffman *et al.* (2003) sugerem que os registros paleoclimáticos andinos são

controlados principalmente pela variabilidade de precipitação sobre a Bacia Amazônica. A média da precipitação atmosférica na Bacia Amazônica é de 2.300 mm/ano, (Marengo e Nobre, 2009) sendo que há uma variação espacial e sazonal de pluviosidade. O maior total pluviométrico anual é observado no litoral do Amapá e no setor ocidental da região, onde a precipitação excede os 5.000 mm/ano, tendo suas máximas em Dez, jan e fev. No Noroeste da Amazônia, os totais caem pra 3.000 mm/ano, tendo suas máximas em abr, mai e jun. Na parte central da Amazônia, os totais caem para 2.500 mm/ano (máximas em mar, abr e mai). Já na parte sul da bacia, as médias ficam superior a 4.000 mm/ano (máximas em fev, mar e abr).

Efeitos pós-deposicionais como sublimação e derretimento podem modificar a composição isotópica da neve originalmente precipitada. Knusel *et al.* 2001 relata sobre a dificuldade em datar e interpretar os registros paleoclimáticos em testemunhos de gelo de geleiras de alta montanha.

Análise das relações entre precipitação e $\delta^{18}O$

Correlação

Para medir o grau de correlação entre as variáveis, foi utilizado o Índice de Correlação de Pearson, e os valores encontrados para as quatro estações sazonais foram inferiores a 0.5, o que indica uma correlação fraca à desprezível, impedindo a determinação de uma regressão linear. A Figura 5 apresenta os gráficos de correlação e erro médio para cada estação sazonal.

Figura 5. Gráficos de correlação (positiva e negativa) e erro médio. (a) Gráfico de correlação positiva e erro médio no verão; (b) Gráfico de correlação positiva e erro médio no outono; (c) Gráfico de correlação negativa e erro médio no inverno e (d) Gráfico de correlação negativa e erro médio na primavera.

A baixa correlação evidenciada pela grande dispersão (Figura 5) não permite uma reconstrução paleoclimática da precipitação a partir da equação linear, utilizando o $\delta^{18}\text{O}$. As baixas correlações e a grande dispersão encontradas podem ser explicadas por diversos motivos, pela variabilidade temporal da série de $\delta^{18}\text{O}$, conforme já relatado anteriormente, e pelo fator precipitação, que na região do Nevado os registros paleoclimáticos andinos são controlados principalmente pela variabilidade de precipitação sobre a Bacia Amazônica. Nesse sentido, a variabilidade de precipitação no Sul do Brasil não é controlada apenas pela umidade vinda da bacia Amazônica. Conforme descrito anteriormente, Reboita et. al. 2010, para o sul do Brasil, a precipitação está associada com: 1) sistemas frontais que se

deslocam do Pacífico, passam pela Argentina e seguem para o nordeste do Brasil. 2) ciclones e frentes frias que se desenvolvem nesta região devido à presença de vórtices ciclônicos ou cavados em altos níveis sobre a costa oeste da América do Sul vindos do Pacífico, e também devido a condições frontogenéticas e/ou ciclogênicas originadas na própria região; 3) CCMs; 4) sistemas ciclônicos em níveis médios conhecidos como vírgula invertida e 5) bloqueios atmosféricos.

Conclusão

Devido à baixa correlação entre as variáveis, e a elevada magnitude do erro, não é possível usar uma equação de regressão para fazer uma

estimativa da precipitação pretérita do sul do Brasil. Sugere-se continuar essa investigação explorando casos específicos, onde existe correlação acentuada, porém se torna insignificante devido ao universo amostral que está inserido, então sugere-se explorar casos específicos, como anos de El Niño e La Niña por exemplo.

Agradecimentos

A CAPES pela concessão da bolsa de doutorado, ao Centro Polar e Climático da UFRGS, ao Programa de Pós Graduação em Geografia da UFRGS, ao professor Jefferson Simões pela disponibilização de material e recursos para a realização do trabalho e a todos os colegas que compartilharam seus conhecimentos e ajudaram na realização do trabalho.

Referências

- Aceituno, P. F., Fuenzalida, H., Rutllant, J., 1994. Meteorological field experiment “Visviri I” in the South American Altiplano. 19th Annual Climate Diagnostics Workshop, College Park, MD, NMC/NOAA.
- Andrade, K. M., 2007. Climatologia e Comportamento dos Sistemas Frontais sobre a América do Sul. Dissertação (Mestrado). São José dos Campos, INPE.
- Bonatti, J. P., Rao, V. B., 1987. Moist baroclinic instability of North Pacific and South American intermediate-scale disturbances. *Journal of the Atmospheric Sciences* 44, 2657-2667.
- Dansgaard, W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16, 436-468.
- Garreaud, R. D., Wallace J. M., 1997. The diurnal of convective cloudiness over the Americas. *Monthly Weather Review* 125, 3157-3171.
- Grimm, A.M., 2009. Variabilidade interanual do clima no Brasil, in: Cavalcanti, I. F., Ferreira, A. N. J., Justi da Silva, M. G, Silva Dias, M. A. F. (Org.), *Tempo e Clima no Brasil*. Oficina de Textos, São Paulo, pp. 353-374.
- Hallak, R., 2000. Aspectos dinâmicos e simulação numérica da formação e evolução de um vórtice de ar frio. Dissertação (Mestrado). São Paulo, IAG-USP.
- Iwabe, C. M. N., da Rocha, R. P., 2009. An event of stratospheric air intrusion and its associated secondary surface cyclogenesis over the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research* 114. Doi:10.1029/2008JD011119.
- Kousky, V. E., 1979. Frontal Influences on Northeast Brazil. *Monthly Weather Review* 107, 1140-1153.
- Lenters, J. D., Cook, K. H., 1997. On the Origin of the Bolivian High and Related Circulation Features of the South American Climate. *Journal of the Atmospheric Sciences* 54, 656-677.
- Maier, E. L. B., 2014. Relações espaço-temporais entre dados paleoclimáticos do Nevado Illimani (Bolívia) e a precipitação na América do Sul. Tese (Doutorado). Porto Alegre, UFRGS.
- Marengo, J. A., Soares, W. R., Saulo, C., Nicolini, M., 2004. Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from NCEP-NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. *Journal of Climate* 17, 2261-2280.
- Marques, R.F.C.; Rao; V.B. 1999. A diagnosis of a long-lasting blocking event over the Southeast Pacific Ocean. *Monthly Weather Review*, vol. 127, p. 1761-1776.
- Marques, R. F. C., Rao, V. B., 2000. Interannual variations of blocking in the Southern Hemisphere and their energetics. *Journal Geophysical Research* 105, 4625-4636.
- Matsuura, K. E., Willmott, C. J., 2009. Terrestrial precipitation: 1900–2008 gridded monthly time series (Versão 4.01). Disponível: <http://climate.geog.udel.edu/~climate/>. Acesso: 20 jan. 2016.
- Miky Funatsu, B., Gan, M. A., Caetano, E., 2004. A case study of orographic cyclogenesis over South America. *Atmosfera* 17, 91-113.
- Nascimento, E. L., Ambrizzi, T., 2002. The Influence of Atmospheric Blocking on the Rossby Wave Propagation in Southern Hemisphere Winter Flows. *Journal of the Meteorological Society of Japan* 80, 139-159.
- Nóbrega, R. S., Cavalcanti, E. P., Souza, E. P., 2005. Reciclagem de vapor d’água sobre a América do Sul utilizando reanálises do NCEP-NCAR. *Revista Brasileira de Meteorologia* 20, 253-262.
- Oliveira, A. S., 1986. Interações entre Sistemas Frontais na América do Sul e Convecção na Amazônia. Dissertação (Mestrado). Cachoeira Paulista, INPE.
- Ramirez, E., Hoffmann, G., Taupin, J. D., Francou, B., Ribstein, P., Caillon, N., Ferron, F. A., Petit, J. R., Landais, A. e Simões, J. C., 2003. A new Andean deep ice core from Illimani (6350 m), Bolivia. *Earth and Planetary Science Letters* 212, 337-350.
- Rao, V. B., Hada, K., 1990. Characteristics of rainfall over Brazil annual variations and connections with the Southern Oscillation. *Theoretical and Applied Climatology* 42, 81-91.

- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., Rocha, R. P., 2009. Relationship between the Southern Annular Mode and Southern Hemisphere Atmospheric Systems. *Revista Brasileira de Meteorologia* 24, 48-55.
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha, R. P., Ambrizzi, T., 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia* 25, 185-204.
- Rodrigues, M. L. G., Franco, D., Sugahara, S., 2004. Climatologia de Frentes Frias no Litoral de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geofísica* 22, 135-151.
- Rozanski, K., Araguas-Araguas, L., Goncanti, R., 1993. Isotopic patterns in modern global precipitation, in: P.K. Swart, K. C., Lohmann, J., MacKenzie, S., Savin (Eds.), *Climate Change in Continental Isotopic Records*. AGU Geophys. Monogr Ser. 78.
- Salio, P., Nicolini, M., Zipser, J., 2007. Mesoscale convective systems over southeastern South American low-level jet. *Monthly Weather Review* 135, 1290-1309.
- Satyamurty, P., Mattos, L. F., 1989. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. *Monthly Weather Review* 117, 1355-1364.
- Silva Dias, M. A. F., 1987. Sistemas de Mesoescala e Previsão de Tempo a Curto Prazo. *Revista Brasileira de Meteorologia* 2, 133-150.
- Thompson, L.G., 1993. Reconstructing the paleo ENSO records from tropical and subtropical ice cores. *Bulletin de Institut Français d'Études Andines* 22, 65-83.
- Velasco, I., Fritsch, J. M., 1987. Mesoscale Convective Complexes in the Américas. *Journal of Geophysical Research* 92, 959-9613.
- Vera, C., Baez, J., Douglas, M., Emmanuel, C. B., Marengo, J., Meitin, J., Nicolini, M., Nogues-Paegle, J., Paegle, J., Penalba, O., Salio, P., Saulo, C., Silva Dias, M. A., Silva Dias, P., Zipser, E., 2006. The South American Low-Level Jet Experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society* 87, 63-77.
- Vimeux, F., Gallaire, R., Bony, S., Hoffmann, G., Chiang, J. C. H., 2005. What are the climate controls on δD in precipitation in the Zongo Valley (Bolivia)? Implications for the Illimani ice core interpretation. *Earth and Planetary Science Letters* 240, 205-220.