

Suscetibilidade à inundação de lagos glaciais na sub-bacia Chajolpaya, norte da Cordilheira Real, Bolívia

Susceptibility to Glacial Lake Outburst Flood in the Chajolpaya subbasin, northern Cordillera Real, Bolivia

Séfora Bertoldi¹, Kátia Kellem da Rosa², Rafael da Rocha Ribeiro³, Carina Petsch⁴

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Polar e Climático, Porto Alegre, RS, Brasil. Email: sefora.bertoldi@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9931-7085>

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Polar e Climático, Porto Alegre, RS, Brasil. Email: katia.rosa@ufrgs.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0977-9658>

³ Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Polar e Climático, Porto Alegre, RS, Brasil. Email: r.ribeiro@ufrgs.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9743-6780>

⁴ Universidade Federal de Santa Maria: Santa Maria, Rio Grande do Sul, BR, Departamento de Geociências, Santa Maria, Brasil. Email: carinapetsch@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1079-0080>

Resumo: Grande parte das geleiras em todo o planeta vem sofrendo retração nas últimas décadas como resposta às mudanças climáticas globais. A perda de área das geleiras em todas as regiões do mundo, ao longo dos séculos XX e XXI, resultou em aumento de lagos glaciais. O objetivo deste estudo foi investigar a suscetibilidade de inundação associada aos lagos glaciais alimentados por geleiras tropicais, localizadas em uma área de estudo piloto da sub-bacia Chajolpaya, no norte da Cordilheira Real, Bolívia, utilizando a metodologia AHP - Análise Hierárquica Ponderada, com auxílio de ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento. Foram utilizadas imagens de satélite, referentes aos anos de 1999, 2011, 2015 e 2022, a partir das quais foram selecionados 16 lagos glaciais na área de estudo, mediante critérios estabelecidos, para serem analisados e monitorados. Os resultados encontrados indicaram que dois lagos possuem muito alta suscetibilidade à inundação (GLOF - *Glacial Lake Outburst Flood*), quatro lagos possuem alta suscetibilidade a GLOF, seis lagos possuem média suscetibilidade, nenhum lago possui baixa suscetibilidade e quatro possuem muito baixa suscetibilidade a GLOF. Tais resultados indicam a existência de riscos criosféricos associados aos lagos de muito alto e alto risco, e que podem impactar as comunidades a jusante.

Palavras-chave: Lagos Glaciais; GLO; Riscos Criosféricos.

Abstract: The global trend of glacier area loss, including those located in mountain environments has increased the number of glacial lakes all regions of the world over the 20th and 21st centuries and various mountain communities are at risk of GLOF events. This study aimed to investigate the flood susceptibility associated with glacial lakes fed by tropical glaciers, located in a pilot study area of the Chajolpaya sub-basin, in the north of the Cordillera Real, Bolivia. To assess susceptibility class of GLOFs, factors were selected from glacial characteristics and the AHP methodology - Weighted Hierarchical Analysis method was used. Satellite images were used, referring to the years 1999, 2011, 2015, and 2022, from which 16 glacial lakes in the study area were selected, according to established criteria, to be analyzed and monitored. The number of glacial lakes and the total area of glacial lakes in the area increased since 2015. According to results, two lakes have very high susceptibility to flooding (GLOF - *Glacial Lake Outburst Flood*), four lakes have high susceptibility to GLOF, six lakes have medium susceptibility, no lake has low susceptibility and four have very low susceptibility to GLOF. These results indicate the existence of cryospheric risks associated with very high and high-risk lakes, which can impact downstream communities.

Keywords: Glacial Lakes; GLOF; Cryospheric Hazards.

1. Introdução

A tendência global de perda de área das geleiras, incluindo as localizadas em ambiente de montanha, ao longo dos séculos XX e XXI, resultou em aumento do número de lagos glaciais (BAJRACHARYA; MOOL, 2009; WILSON et al., 2018). Os lagos glaciais se formam atrás de morainas ou atrás de barragens de gelo e o rompimento dessas barragens pode resultar em uma inundação, evento conhecido como GLOF - *Glacial Lake Outburst Flood* (ITURRIZAGA, 2011). Nesses eventos, a água derretida acumulada no lago glacial é liberada repentinamente (ITURRIZAGA, 2011), podendo gerar inundações a jusante, com impactos socioeconômicos e geomórficos (RICHARDSON; REYNOLDS, 2000; CAREY, 2005).

Os lagos que apresentam risco de rompimento são geralmente associados aos mais próximos à geleira, lagos em setor de alta declividade, lagos em locais em que a geleira está retraindo e lagos represados por morainas com pequena dimensão (HU et al., 2022; GAIKWAD et al., 2022), portanto, salienta-se que diversas comunidades em ambiente de montanha estão em área de risco a GLOF (WORNI et al., 2012; ANACONA; MACKINTOSH; NORTON, 2015; ZHANG et al., 2023). Sendo assim, as geleiras tropicais possuem ligação com lagos glaciais e rios, os quais são considerados relevantes para diversas comunidades bolivianas. Ademais, importantes rios bolivianos fazem parte da bacia do rio Madeira, compondo a região hidrográfica do Amazonas (RIBEIRO, 2014). Nesse viés, a Cordilheira Real, localizada na Bolívia, foi escolhida para a realização deste estudo.

As geleiras tropicais de montanha são bons indicadores das mudanças climáticas e o seu monitoramento é importante para compreender a relação entre a Criosfera e as alterações climáticas. Os estudos de geleiras de montanha, lagos glaciais e GLOF são importantes também para as comunidades que vivem na região da Cordilheira Real, em termos de disponibilidade de água e dos riscos criosféricos relacionados, podendo a presente pesquisa contribuir para o entendimento dos riscos criosféricos associados aos lagos glaciais, a partir da aplicação e discussão do método da Análise Hierárquica Ponderada (AHP) na área de estudo. Além disso, a compreensão da evolução temporal da área dos lagos em resposta à retração glacial na Cordilheira Real, com dados de sensores remotos, pode contribuir para comparar com outros estudos realizados sobre GLOF na região.

Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo geral investigar a suscetibilidade de inundação associada aos lagos glaciais influenciados por geleiras tropicais em uma área localizada na sub-bacia hidrográfica Chajolpaya, localizada na porção norte da Cordilheira Real, na Bolívia, utilizando dados de sensores remotos orbitais.

2. Metodologia

Na Figura 1 está identificada a área de estudo deste trabalho, a sub-bacia hidrográfica Chajolpaya, localizada na Cordilheira Real, que é uma vasta cadeia de montanhas situada ao norte da capital da Bolívia. A tabela 1 apresenta os dados utilizados para a realização do presente estudo. A seleção das imagens de satélite considerou as épocas menos chuvosas, ou seja, com menor quantidade de nuvens, portanto, entre os meses de maio a outubro. As imagens de satélites selecionadas para realização desta pesquisa foram corregristadas e o erro médio quadrado (RMSE - *Root Mean Squared Error*) obtido foi entre 0,34 e 5,97 m. A vetorização dos lagos foi feita com base em imagens dos anos de 1999, 2011, 2015 e 2022. Os processamentos e organização do banco de dados foram realizados no ArcGIS.

Tabela 1 – Dados e respectivas fontes utilizadas na pesquisa.

Dados	Fonte
Dados de precipitação	http://senamhi.gob.bo/index.php/inicio
<i>Global Land Ice Measurements from Space - GLIMS</i>	https://www.glims.org/
<i>Shapefiles</i> de rios e canais da região de estudo	http://geo.gob.bo/portal/
MDE (Alos Palsar)	https://search.asf.alaska.edu/#/
Imagem <i>Planet Scope</i>	https://www.planet.com/explorer/
Imagem <i>WorldView-2</i>	-
Imagens Landsat 5	https://earthexplorer.usgs.gov/

Fonte: Autores (2023).

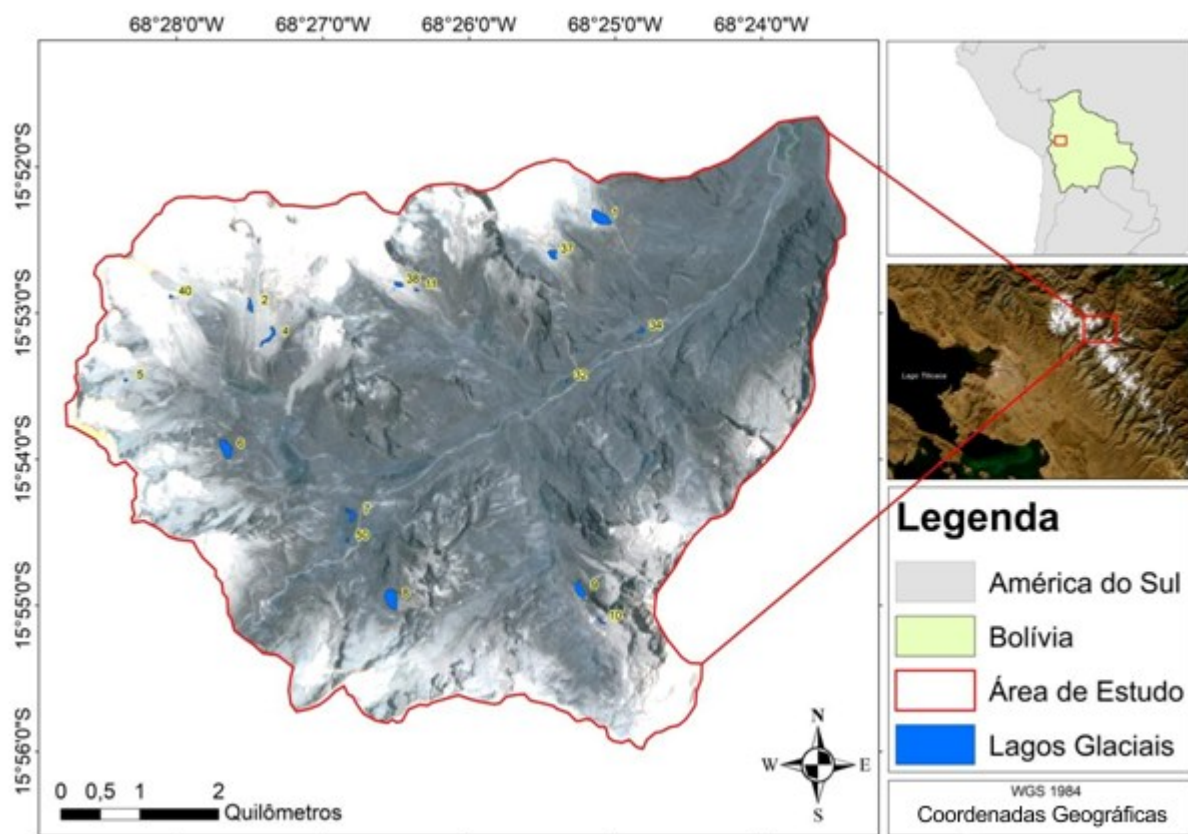


Figura 1 – Sub-bacia de estudo e lagos glaciais analisados

Fonte: Autores (2023).

Os lagos foram numerados para a realização do estudo.

Para delimitação da sub-bacia referente à área de estudo foi utilizada a imagem do satélite *Planet Scope*, do ano de 2022, na composição colorida. A imagem foi importada para o *software* ArcGIS. Vetorizou-se a sub-bacia hidrográfica da área de estudo, tendo como base os polígonos das sub-bacias de drenagens glaciais mapeados e disponibilizados pelo *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS), além de utilizar *shapefiles* de canais e rios da área da região. Ainda nessa etapa, foi feito o *download* do Modelo Digital de Elevação (MDE) do satélite ALOS com sensor PALSAR, que traz informações de altimetria, e que auxiliou a realizar a vetorização da sub-bacia. Após a delimitação da sub-bacia de estudo foi calculada a área da sub-bacia, sendo encontrado o valor de 49,63 km².

Em relação aos parâmetros e pesos utilizados para aplicação da metodologia AHP, adaptou-se a metodologia de Gaikwad et al. (2022). No presente estudo foram utilizados os seguintes parâmetros: área dos lagos glaciais (AL), área da geleira adjacente (AG), distância dos lagos até a geleira adjacente (DG), declividade (D), elevação dos lagos (EL), tipo de barragem dos lagos (TB), distância entre os lagos e comunidade mais próxima (DC) e distância entre lagos e o rio (DR). Já as classes e notas foram elaboradas de acordo com as características específicas do presente estudo. Portanto, foram aplicados oito parâmetros com distintas classes e pesos (Tabela 2). Em relação às classes de cada parâmetro, cabe mencionar que a classe 1 significa risco baixo, a classe 2 risco médio e a classe 3 risco alto. Em relação aos pesos de cada parâmetro, foram utilizados os mesmos aplicados em Gaikwad et al. (2022).

Após obtenção e processamento dos oito parâmetros acima descritos e inclusão das suas respectivas classes/notas na tabela de atributos do *shapefile* dos lagos em 2022, realizou-se a conversão desses polígonos para *raster* (resolução espacial de 3 m). Após ter sido concluído este passo, foi possível aplicar a AHP no presente estudo, adaptando a metodologia de Gaikwad et al. (2022) (Figura 2).

Tabela 2 – Parâmetros e suas respectivas classes e pesos.

Parâmetro	Classes do Parâmetro	Peso do Parâmetro (AHP)
Área do Lago (AL)	1 - até 0,00025 km ²	0,294
	2 - entre 0,00025 e 0,01 km ²	
	3 - acima de 0,01 km ²	
Área da Geleira Adjacente (AG) ou Cobertura Glacial	1 - até 1,18 km ²	0,247
	2 - entre 1,18 e 5,27 km ²	
	3 - acima de 5,27 km ²	
Distância do Lago até a Geleira Adjacente (DG)	1- maior que 2 km	0,161
	2 - entre 0,5 e 2 km	
	3 - menor que 0,5 km	
Declividade entre Geleira e Lago (D)	1 - menor que 30°	0,098
	2 - entre 30 e 45°	
	3 - maior que 45°	
Elevação do Lago (EL)	1 - menor que 4.390 m	0,094
	2 - entre 4.390 e 5.075 m	
	3 - acima de 5.075 m	
Tipo de Barragem do Lago (TB)	1 - sem barragem	0,049
	2 - com barragem rochosa	
	3 - com barragem de moraina	
Distância da Sub-bacia até a Comunidade (DC)	1 - maior que 50 km	0,036
	2 - entre 30 e 50 km	
	3 - menor que 30 km	
Distância do Lago até o Rio (DR)	1 - maior que 2.400 m	0,020
	2 - entre 1.200 e 2.400 m	
	3 - menor que 1.200 m	

Fonte: Autores (2023) - parâmetros e pesos adaptados de Gaikwad et al. (2022).

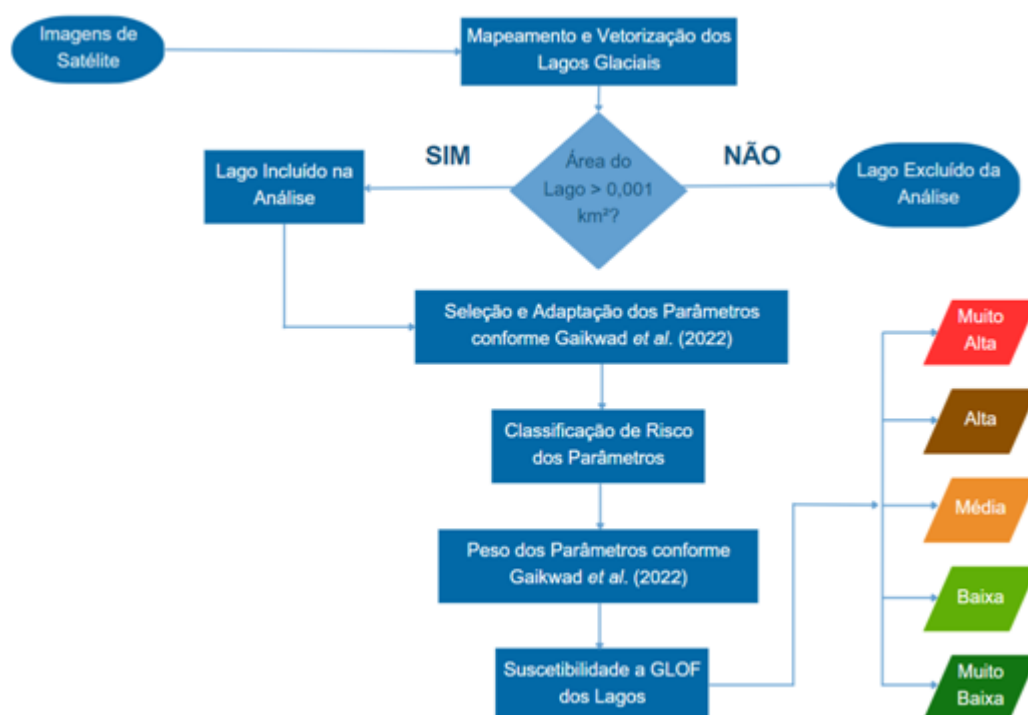


Figura 2 – Fluxo realizado para aplicação do método AHP.

Fonte: Autores (2023).

Para finalizar a metodologia da análise hierárquica ponderada, foi realizado o cálculo de suscetibilidade a GLOF, utilizando os arquivos *raster* gerados para cada parâmetro (os quais contêm as classes de cada lago) e os seus respectivos pesos:

$$\text{Suscetibilidade a GLOF} = ((AL*0,294) + (AG*0,247) + (DG*0,161) + (D*0,098) + (EL*0,094) + (TB*0,049) + (DC*0,036) + (DR*0,020))$$

Em que,

AL = *Raster* da Área dos Lagos

AG = *Raster* da Área das Geleiras Adjacentes (cobertura glacial)

DG = *Raster* da Distância dos Lagos até a Geleira Adjacente

D = *Raster* da Declividade entre os Lagos e a Geleira Adjacente

EL = *Raster* da Elevação dos Lagos

TB = *Raster* do Tipo de Barragem dos Lagos

DC = *Raster* da Distância dos Lagos até a Comunidade mais próxima

DR = *Raster* da Distância dos Lagos até o Rio

3. Resultados e discussão

3.1 Variação da Área dos Lagos Glaciais

A sub-bacia apresentou 50 lagos diferentes ao observar as imagens de satélite, mas apresentou 32 lagos no ano de 2022, representando uma área total de 0,1558 km² nessa data. Para o presente estudo, foram considerados apenas os lagos com área superior a 0,001 km² no ano de 2022 (Figura 3), adaptando a proposta de Kougkoulos (2019). Ou seja, do total de 32 lagos em 2022, restaram 16 para análise, os quais representam uma área de 0,1483 km². Os lagos variaram em número e área no período.

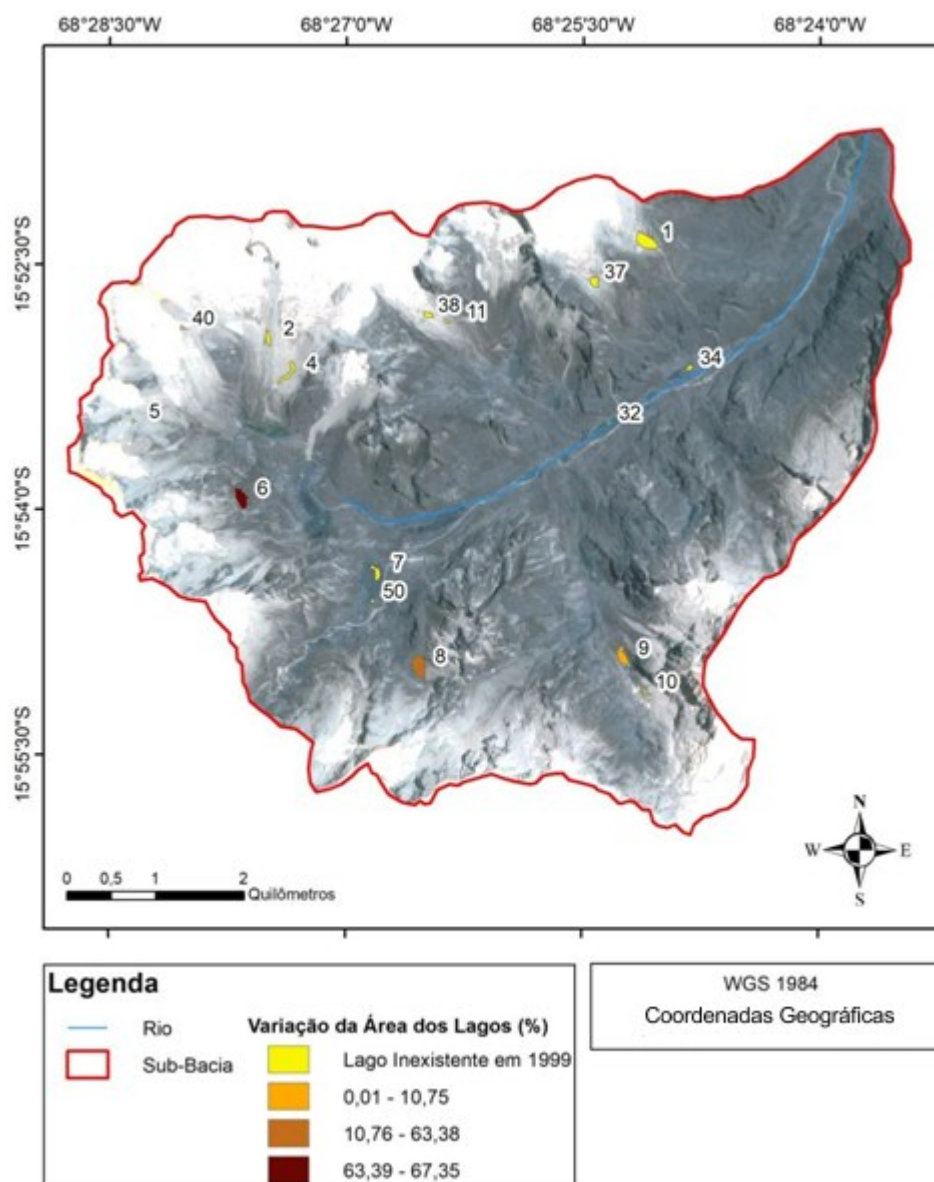


Figura 3 – Mapa de variação da área dos lagos entre 1999 e 2022.

Fonte: Autores (2023).

Em 1999, foram identificados três lagos glaciais na área de estudo, representando uma área total de 0,046 km², sendo que estes lagos continuaram a existir em 2022. Considerando os 16 lagos em 2022, a área total de cobertura lacustre aumentou 222,31% em relação a 1999. Os resultados vão ao encontro do proposto por Anaconda, Mackintosh e Norton (2015), que afirmaram haver um aumento em quantidade e tamanho de lagos glaciais no mundo todo nos últimos 40 anos, em função do recuo das geleiras.

As áreas obtidas para os lagos em cada data, provavelmente, estão em contexto de um período do ano em que há menor volume de água, tendo em vista que as imagens coletadas são referentes aos meses de maio e outubro, que são meses menos chuvosos naquela região. Além de mais seca, o aporte de água de degelo pelas geleiras é menor do que no período úmido, o que também pode influenciar para uma área menor dos lagos nas datas analisadas e, consequentemente, para o risco a GLOF. Portanto, sugere-se que outros estudos sejam conduzidos incluindo imagens de satélites para o período úmido.

Observa-se a variação espaço-temporal na área dos lagos desde 1999 (Figura 3). Apenas os lagos 6, 8 e 9 já existiam em 1999. Todos os lagos tiveram aumento de área, exceto os lagos 11, 32 e 34, que surgem somente a partir da imagem de 2015 e sofrem uma redução de área entre 2015 e 2022 (valores baixos quando comparados ao de aumento da maioria dos lagos). O lago 9 teve um aumento de sua área entre 1999 e 2015, e uma redução entre 2015 e 2022, contudo, a área em 2022 ainda se manteve maior do que em 1999. Os lagos 37, 38, 40 e 50 são “novos”, pois surgem somente na imagem de 2022. O lago com maior variação de área é o ID 6 (aumentou em 67,35%).

Para o cálculo variação de área dos lagos utilizou-se apenas o ano de 1999 (havia só 3 lagos) em relação ao ano de 2022 (16 lagos), ou seja, essa variação é somente positiva, pois os 3 lagos em 1999 aumentaram em relação a 2022. Para os demais 13 lagos foi considerado que não existiam e por isso não foi feito nenhum cálculo.

Resultados de aumento em quantidade e tamanho de lagos também são encontrados em outras áreas (SHUKLA; GARG; SRIVASTAVA, 2018; ANACONA; MACKINTOSH; NORTON, 2015; CARRIVICK; TWEED, 2013), inclusive na Bolívia (COOK *et al.*, 2016). O estudo de Cook *et al.* (2016) demonstrou que houve um aumento em número e tamanho (área) de lagos proglaciais na Cordilheira Oriental boliviana, no período de 1986 a 2014, sendo que o número total de lagos localizados a menos de 500 m das margens da geleira aumentou de 145 para 225 lagos (55%), enquanto a área dos lagos aumentou de $6,33 \pm 0,63$ para $8,73 \pm 0,87$ km² (38%). Da mesma forma, o comportamento dos lagos no presente estudo indica que as mudanças climáticas podem estar provocando um aumento no degelo das áreas com cobertura glacial nas últimas décadas, levando à expansão dos lagos já existentes, além da formação de novos lagos, cenário que indica um aumento potencial de inundações por GLOF.

Para um período de 32 anos (1986-2018), na Cordilheira Real, Kougkoulos (2019) demonstrou que as geleiras situadas abaixo de 5.000 m de altitude retraíram de 28 km² para 5 km², as geleiras entre 5.000 e 5.500 m de altitude retraíram de 208 km² para 106 km² (49%), e as geleiras acima de 5.500 m de altitude retraíram de 79 km² para 59 km² (25%).

Alguns lagos podem ter um comportamento de redução de suas áreas e desaparecimento ao longo dos próximos anos, pois as geleiras contribuem para o fluxo dos rios durante a estação seca, nas regiões em que há forte sazonalidade na precipitação (MARK; MCKENZIE, 2007; SORUCO *et al.*, 2015). Esse fluxo tenderá a se intensificar quando a perda de massa das geleiras acelerar (LAFRENIERE; MARK, 2014), contudo, esse é um efeito temporário, que irá diminuir conforme a geleira reduzir de tamanho (POUYAUD *et al.*, 2005).

Futuramente, o desaparecimento completo das geleiras da Cordilheira Real levará a uma redução no escoamento de 12% ao ano, e de 24% durante a estação seca (SORUCO *et al.*, 2015). Fazendo um paralelo com a variação das áreas dos lagos, pode-se compreender que os lagos glaciais tenderão a aumentar rapidamente em tamanho e quantidade nos próximos anos, em função do recuo das geleiras. Tal fato poderá proporcionar um maior abastecimento temporário de água para a população, tendo em vista que os países andinos são muito dependentes da água doce das bacias glaciais, que são utilizadas para uso doméstico, agrícola ou industrial (RIBEIRO, 2014), e, ao mesmo tempo, poderá deixá-la mais exposta a eventos de GLOF. Por outro lado, na medida em que o gelo for desaparecendo desses locais, esses eventos não irão mais acontecer (HAEBERLI; WHITEMAN, 2021).

Isto posto, compreender a variação espaço-temporal, padrão de formação e taxa de aumento de lagos glaciais é necessário para avaliar a probabilidade de ocorrência de GLOFs. Um inventário de lagos atualizado, detecção de mudança de área, classificação e avaliação de suscetibilidade de GLOF de lagos glaciais são fatores críticos que representam grandes obstáculos para as estratégias de mitigação e melhor preparação contra perigos glaciais (GAIKWAD *et al.*, 2022; GAIKWAD; GUHA; TIWARI, 2022).

Muitos lagos podem deixar de ser alimentados diretamente pelas geleiras com a continuidade da retração glacial para a região. O lago 11 evidenciou um comportamento de diminuição de área relacionado com a retração da geleira, conforme foi verificado ao observar as imagens de satélite utilizadas para identificar os lagos. Neste sentido, o estudo de Rounce *et al.* (2023) projetou que o aumento da temperatura global entre 1,5° a 4°C resultará em perdas de um quarto a quase metade da massa das geleiras do mundo, até o ano de 2100, tendo em vista que a perda de massa está diretamente relacionada ao aumento da temperatura.

As discussões trazidas na Conferência das Partes de 2021 (COP26) indicaram que a temperatura média global deverá aumentar em 2,7°C neste século. A perda de massa glacial afeta o aumento do nível do mar, os recursos hídricos e os riscos naturais. Conforme Fischer *et al.* (2016), a aceleração do degelo em geleiras de montanha sinaliza fortemente a mudança climática global e afeta os processos geomorfológicos e hidrológicos locais.

3.2 Características dos Lagos Glaciais

Em relação à área dos lagos, para o ano de 2022, constatou-se que nenhum possui área abaixo de 0,00025 km², 11 lagos possuem área entre 0,00025 e 0,01 km², e 5 lagos possuem área acima de 0,01 km². Conforme Wang, Qin, e Xiao (2015), nos últimos 20 desastres GLOF que possuem algum registro, 95% das áreas de lagos excederam 0,02 km². No presente estudo foram identificados 3 lagos glaciais com área acima de 0,02 km², que são os com identificação 1, 6 e 8.

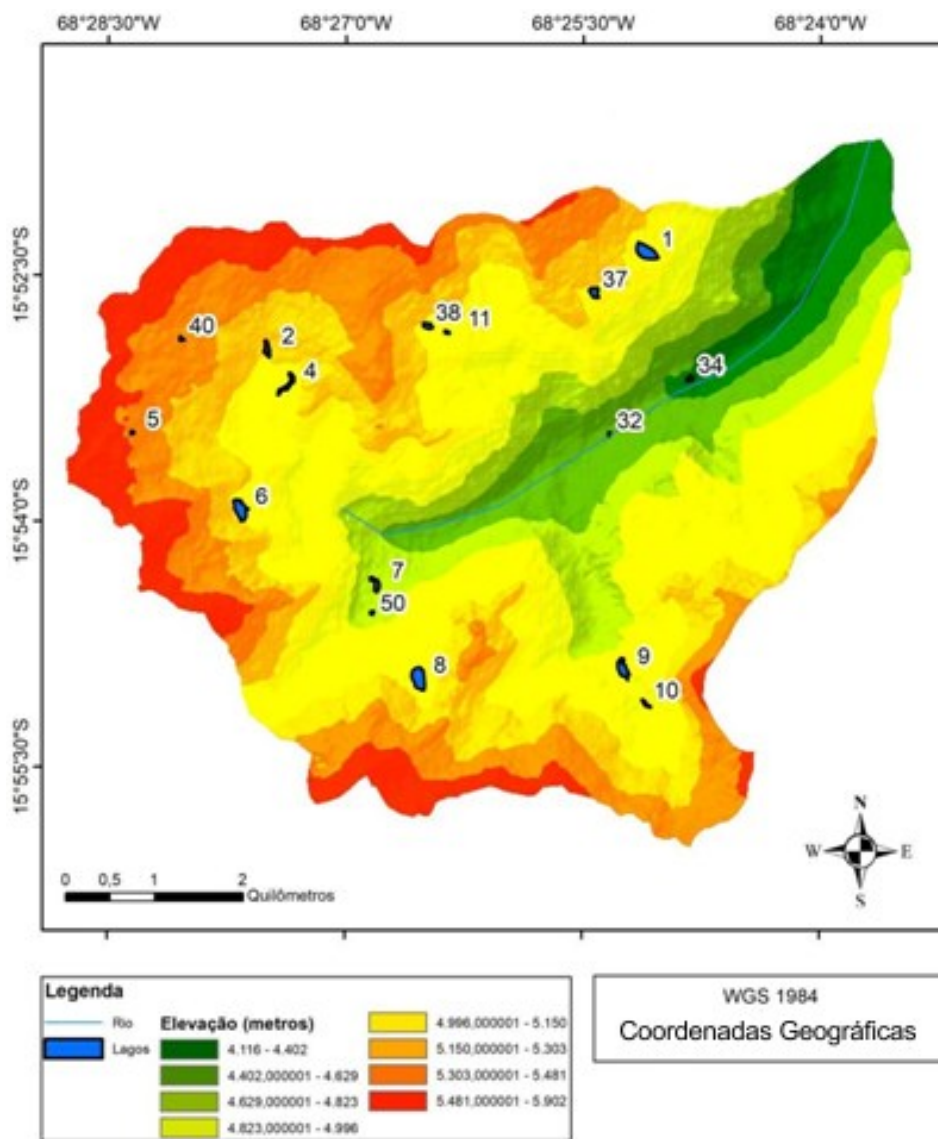


Figura 4 – Mapa de elevação da área de estudo.

Fonte: Autores (2023).

Kougkoulos (2019) removeu de sua análise os lagos menores que 0,01 km², pois obteve baixo risco para lagos nesse contexto. Adaptando a metodologia de Kougkoulos (2019), foram removidos do presente estudo, os lagos com área inferior a 0,001 km². Para trabalhos futuros, sugere-se a utilização do volume dos lagos como parâmetro de análise, conforme fizeram os autores Qi et al. (2022), e não apenas a área dos lagos.

Um lago glacial estável é aquele que existe continuamente na série temporal da pesquisa, ao passo que um lago glacial instável se refere àqueles lagos novos e aos que estão desaparecendo (ZHANG *et al.*, 2023). No presente trabalho foi possível identificar apenas 3 lagos estáveis, ou seja, que são observados ao longo de todo o período de estudo. Os demais lagos podem ser considerados instáveis, com 4 deles sendo identificados apenas na imagem de 2022. O monitoramento desses lagos é importante, pois, conforme Wang, Qin, e Xiao (2015), as mudanças rápidas na área de lagos podem perturbar o equilíbrio hídrico, resultando em GLOFs de lagos represados por morainas.

A distância de cada lago até a geleira adjacente variou de 0 a 2 km. Observou-se que um lago está a uma distância maior do que 2 km da sua geleira adjacente, sete lagos estão a uma distância entre 0,5 e 2 km, e oito lagos estão a uma distância menor do que 0,5 km. A ocorrência de GLOFs é provável quando os lagos proglaciais estão a 500 m de uma geleira (WANG *et al.*, 2011; WANG; QIN; XIAO, 2015; COOK *et al.*, 2016), pois os lagos em contato com o gelo ou a uma distância menor de 500 m da geleira podem ser atingidos por movimentos de massa, gerando ondas consideráveis. Isso foi o que ocorreu no GLOF de 1941, no lago Palcacocha, quando um desprendimento na geleira provocou uma inundação que destruiu a cidade de Huaraz e causou cerca de 6.000 mortes (CAREY *et al.*, 2012).

O estudo de Kougkoulos (2019) considerou as seguintes classes de risco para o parâmetro da distância entre o lago glacial e a geleira adjacente: 500 a 250 m (baixo risco), 250 a 10 m (médio risco), 10 m até contato com a geleira (alto risco). O autor enfatizou que a seleção desses valores foi um tanto subjetiva. De forma semelhante, no presente estudo, foi preciso adaptar as classes e considerar de alto risco aqueles lagos localizados a menos de 500 m (0,5 km) da geleira, isso porque a distância média entre os lagos e a geleira adjacente é maior do que 500 m. Por exemplo, o lago 32 está localizado a 2,28 km da sua geleira adjacente.

O contexto de elevação máxima da sub-bacia de estudo é de 5.902 m e a elevação mínima é de 4.116 m, resultando em uma elevação média de 5.042 m. O lago mais elevado (ID 5) está a uma altitude de 5.447 m, enquanto o menos elevado (ID 34) está a 4.390 m (Figura 4). É interessante destacar que o setor Norte da sub-bacia possui maior elevação, o que pode explicar também a maior presença de cobertura glacial nessa região. A inexistência de lagos abastecidos pelo setor Norte em 1999 evidencia a elevação da frente glacial no período.

Em quatro lagos foi possível identificar o tipo de barramento rochoso, sendo que dois deles (IDs 1 e 37) estão situados em um vale de circo. Para esses foi atribuída a classificação de risco 2, pois, de certa forma, não se tratam de lagos “represados”, mas lagos que ocupam depressões, também chamados de lagos confinados (MERGILI; SCHNEIDER, 2011; KOUGKOULOS, 2019). Portanto, são considerados lagos relativamente estáveis, tendo em vista o tipo de barragem (HUGGEL *et al.*, 2004). Foram identificados nove lagos cujo barramento é formado por morainas, aos quais foi atribuído o risco 3, esse tipo de lago é considerado mais perigoso, pois, um evento inicial pode formar uma brecha na moraina, drenando o lago (WESTOBY *et al.*, 2015). Ainda, foram identificados três lagos sem nenhum tipo de barramento, aos quais foi atribuído risco 1, tendo em vista que não há risco de rompimento brusco.

Em relação às comunidades a jusante da área de estudo, a mais próxima está a uma distância de 30.71 km, em linha reta. Esta distância foi considerada como risco médio no presente estudo.

Quanto à distância entre os lagos e o rio, foram encontrados os seguintes resultados: cinco lagos estão localizados a 1.200 m do rio ou menos, sendo esses classificados como de alto risco; oito lagos estão localizados a uma distância entre 1.200 e 2.400 m do rio, sendo classificados como de médio risco; e três lagos estão a uma distância maior de 2.400 m, aos quais foi atribuído baixo risco. A proximidade dos lagos glaciais com o curso do rio pode ter grande impacto quando da ocorrência de um GLOF.

A declividade máxima encontrada na sub-bacia de estudo foi de 77,63° e a mínima de 0°, resultando em uma declividade média de 27,24°. Em relação à declividade entre os lagos e as suas respectivas geleiras, foram identificados 4 lagos com declividade entre 30° e 45° e 12 lagos com declividade acima de 45°. Nenhum dos lagos apresentou declividade inferior à 30° em relação a sua geleira adjacente, o que indica que todos os lagos estão classificados como médio ou alto risco com relação ao parâmetro da declividade.

Conforme Wang *et al.* (2011), a distância do lago até a geleira adjacente, assim como a declividade entre eles, são fatores que influenciam significativamente na possibilidade de que o gelo atinja o lago glacial após o seu desprendimento. Apenas o lago com ID 2 está em uma área de menor declividade, apesar disso, este ainda ficou na classe 2 de risco, pois, áreas com declive entre 30° e 45° estão a menos de 250 m de proximidade desse lago. Ou seja, as encostas íngremes estão mais afastadas deste lago do que dos outros, mas, ainda assim, estão a menos de 250 m. Conforme Carrivick e Tweed (2013), aumentos no ângulo e no relevo do talude, juntamente com a perda de atrito interno e coesão dos materiais do talude, preparam os taludes para a falha. Essas condições propiciam uma maior suscetibilidade a movimentos de massa.

3.3 Suscetibilidade de Inundação Associada aos Lagos Glaciais

Dois lagos possuem suscetibilidade muito alta a GLOF, quatro lagos possuem suscetibilidade alta, seis lagos possuem suscetibilidade média, nenhum lago possui suscetibilidade baixa, e quatro lagos possuem suscetibilidade muito baixa (Figura 5). O método AHP se apresenta como uma alternativa plausível para o monitoramento de regiões de difícil acesso, podendo ser adaptado conforme as características específicas da área de estudo. Se aplicado conjuntamente com pesquisa de campo, o resultado poderá ser ainda mais preciso. O estudo de Zhang et al. (2023) também utilizou o método AHP e o resultado obtido acabou sendo validado, pois o lago que obteve a maior pontuação de avaliação de risco sofreu um evento de GLOF em 2020.

Os lagos 1 e 4, identificados como lagos de suscetibilidade muito alta a GLOF, estão localizados na porção Norte da sub-bacia, setor que possui a maior área de cobertura glacial. Esses lagos também foram classificados como de alto risco em relação aos seguintes parâmetros: área do lago, distância até a geleira adjacente e declividade. Esses são os quatro parâmetros de maior peso na metodologia AHP, o que influenciou nos resultados para os lagos 1 e 4 (muito alta suscetibilidade).

Em relação aos lagos 5, 11, 37 e 38, que foram considerados de alta suscetibilidade a GLOF, foi possível verificar que esses também obtiveram nota 3, ou seja, risco alto, em relação aos parâmetros área de cobertura glacial, distância à geleira, e declividade. Já no parâmetro área dos lagos, todos obtiveram nota 2, portanto, médio risco, o que foi o diferencial para que esses fossem considerados lagos de alta suscetibilidade a GLOF, ao invés de muito alta suscetibilidade.

Já os lagos 2, 6, 8, 9, 34 e 40, classificados como de média suscetibilidade a GLOF, tiveram notas mais variadas em cada parâmetro. Nenhum dos lagos foi classificado como de baixa suscetibilidade a GLOF, porém todos os lagos têm suscetibilidade e os lagos 7, 10, 32 e 50 foram classificados com suscetibilidade a GLOF muito baixa, isso porque poucos parâmetros desses lagos foram classificados com classe/nota 3 (alto risco). O lago 32, por exemplo, apesar de ter nota 3 para os parâmetros área da cobertura glacial, declividade e distância até o rio, possui nota 1 para a distância até a geleira e tipo de barragem. O lago 10 possui nota 3 para declividade e tipo de barragem, e os lagos 7 e 50 possuem nota 3 apenas para o parâmetro distância até o rio.

É importante observar que, em 1999, os lagos 1 e 4 não foram identificados nas imagens, sugerindo que estes ainda não existiam. No ano de 2011, o lago 1 apareceu e, na verdade, ele se tratava de dois lagos menores, que acabaram se unindo, conforme pôde ser observado já na imagem de 2015. Em relação ao período de 2011 a 2022, o lago 1 teve um incremento de área de 0,0251 km², o que representa um aumento de 836,67%. Da mesma forma, o lago 4 apareceu nas imagens apenas em 2011 e no ano de 2015 já estava unificado (em 2011 também eram 2 lagos). Em relação ao período de 2011 a 2022, o lago 4 teve um aumento de área de 0,0070 km², representando um crescimento de 194,44%.

O comportamento dos lagos 1 e 4 no período estudado pode ser uma resposta à perda de massa das geleiras conforme observado por outros autores (COOK et al., 2016; KOUGKOULOS, 2019) e indica que o presente cenário de suscetibilidade a GLOF pode vir a se tornar ainda mais preocupante. Pode-se dizer que o monitoramento dos lagos e geleiras da sub-bacia estudada, principalmente dos lagos 1 e 4, seria uma das principais medidas a serem adotadas no sentido de mitigar os riscos criosféricos associados a eles, como os riscos de inundações.

Ao mesmo tempo, os lagos glaciais são fonte de água para a população a jusante e para diversas atividades econômicas. O gerenciamento e monitoramento de lagos glaciais pode gerar cobenefícios com relação à diminuição de riscos de desastres, gestão de recursos hídricos e produção de energia, mas as restrições legais, sociais, culturais e políticas para sua implementação permanecem (HAEBERLI et al., 2016; VUILLE et al., 2018).

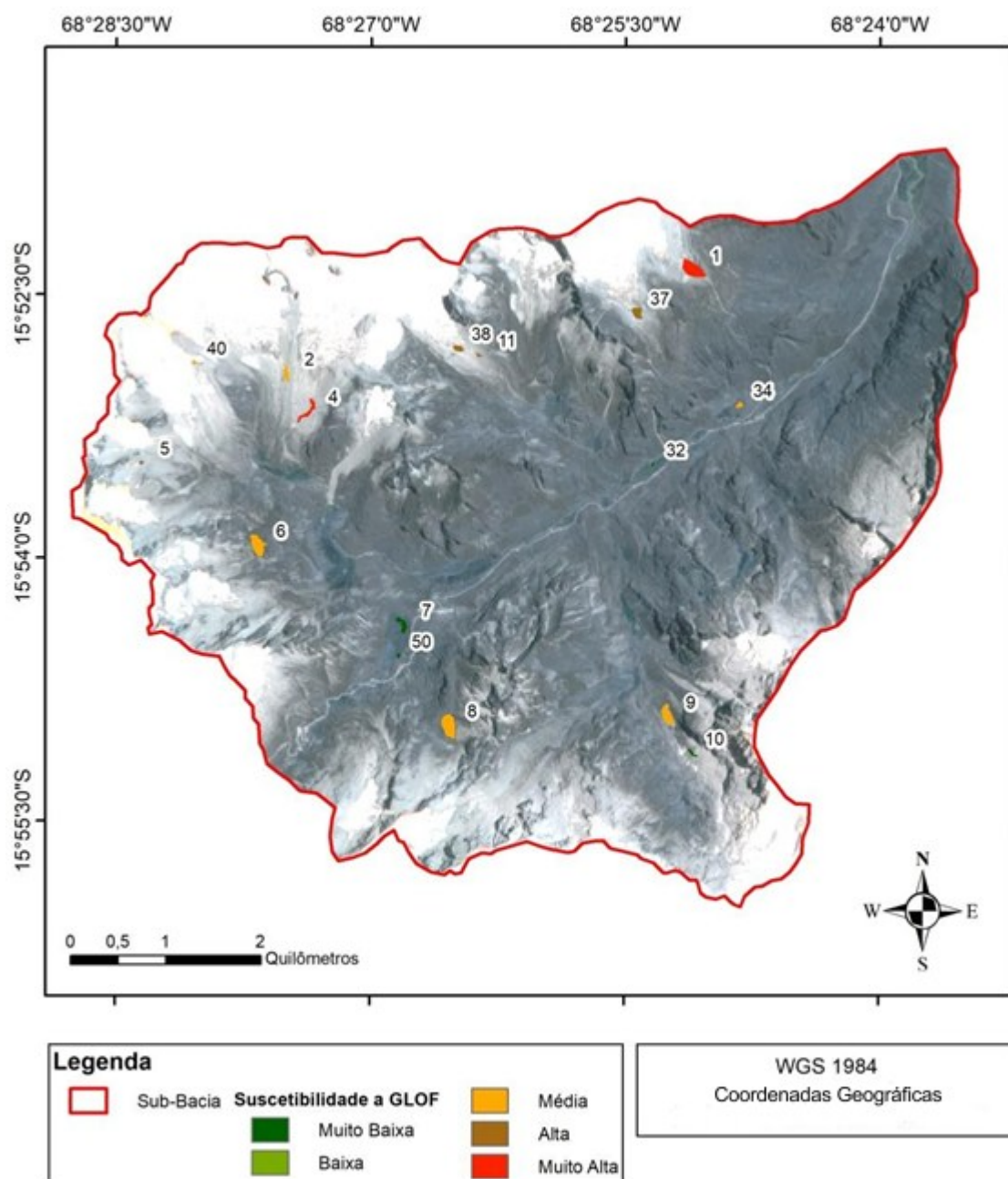


Figura 5 – Mapa de suscetibilidade a GLOF.

Fonte: Autores (2023).

Comunidades a jusante podem ser impactadas negativamente, a exemplo do GLOF de 1941 em Palcacocha, no Peru. Ou seja, a deglaciação das geleiras e os lagos proglaciais são um desafio para o monitoramento futuro. É preciso que mais áreas sejam monitoradas para obtenção de dados confiáveis e desenvolvimento de medidas de adaptação local e modelos de processo para outras regiões do mundo (FISCHER *et al.*, 2016).

O estudo de Kougkoulos (2019) abrangeu 3 lagos de grandes dimensões na Bolívia e, ao analisar os cenários potenciais de inundação nas comunidades a jusante, verificou que 1.140 pessoas seriam afetadas. O autor destaca, ainda, que os lagos devem ser monitorados diante da retração das geleiras, a fim de avaliar as consequências para o seu volume.

Essa mesma consideração pode ser aplicada para os lagos alimentados por geleiras na sub-bacia Chajolpaya. Para uma melhor adaptação aos riscos relativos às geleiras é preciso que haja planejamento e implementação de medidas preventivas, como identificação dos perigos, códigos de construção, zoneamento e planejamento do uso da terra, estabelecimento de rotas de evacuação, alertas e sistemas de alarme, protocolos de emergência, educação e programas de extensão, entre outras medidas (SCHNEIDER *et al.*, 2014; MUÑOZ *et al.*, 2016). Esse enfrentamento precisará estar baseado em estratégias abrangentes, que promovam integração entre ciência, cultura, política e prática, além de envolver as populações locais (PAYNE; SHEPARDON, 2015).

4. Considerações finais

Este estudo analisou os riscos criosféricos associados a lagos glaciais localizados na porção Norte da Cordilheira Real, na Bolívia. O maior detalhamento temporal da análise com imagens de alta resolução espacial é relevante para compreender a variação dos lagos ao longo das últimas décadas. Os lagos podem ter uma variação interanual influenciada pela precipitação e o derretimento da cobertura de neve e gelo na sub-bacia e o comportamento dessas variáveis podem ser consideradas na avaliação dos resultados sobre a área dos lagos.

Dentre os lagos glaciais encontrados no ano de 2022 (um total de 32), foram selecionados 16 para serem analisados e monitorados neste estudo, a partir de critérios estabelecidos. Utilizando a metodologia de AHP, foram identificados 2 lagos com muito alta suscetibilidade a GLOF e 4 lagos com alta suscetibilidade, indicando a existência de riscos criosféricos associados a estes lagos. O monitoramento da área de estudo, por meio da análise de suscetibilidade a GLOF, é relevante para as comunidades que vivem a jusante da sub-bacia e para as autoridades locais, que podem planejar políticas de monitoramento para aquela região com maior clareza.

Para discussões futuras, sugere-se que seja realizada uma caracterização mais detalhada da área de estudo. Em relação aos parâmetros abordados no estudo, sugere-se que seja utilizado o volume do lago, ao invés da área, e que seja feita uma vetorização individual por geleira adjacente, ao invés de vetorização por setor, tendo em vista que ambos os parâmetros possuem um peso elevado na metodologia AHP, aplicada no presente estudo. Além disso, recomenda-se a realização de uma pesquisa das populações a jusante, para obtenção de informações como o número de habitantes e quantidade de construções e edificações, no intuito de entender os impactos dos riscos associados a GLOFs.

Os Andes tropicais já enfrentam muitos desafios relacionados ao abastecimento e uso sustentável de água doce, além dos perigos de alta montanha, em função das mudanças climáticas e socioambientais. Esse enfrentamento precisará estar baseado em estratégias abrangentes, que promovam integração entre ciência, cultura, política e prática, além de envolver as populações locais.

Agradecimentos

Agradecemos o suporte na pesquisa fornecido pelo Centro Polar e Climático (CPC) e a PROPESq da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), a FAPERGS, e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- ANACONA, P. I.; MACKINTOSH, A.; NORTON, K. Reconstruction of a glacial lake outburst flood (GLOF) in the Engaño Valley, Chilean Patagonia: Lessons for GLOF risk management. **Science of the Total Environment**, p. 1–11, 2015.
- BAJRACHARYA, S.R.; MOOL, P. Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. **Annals of Glaciology**, v.50, p.81–86, 2009.
- CAREY, M. *et al.* An integrated socioenvironmental framework for glacial hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. **Clim. Chang.** v.112, p.733–767, 2012.
- CAREY, M. Living and dying with glaciers: people's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. **Global and Planetary Change**, v.47, p.122–134, 2005.

-
- CARRIVICK J.L.; TWEED F.S. Proglacial lakes: character, behaviour and geological importance. **Quaternary Science Reviews**, v. 78, p. 34–52, 2013.
- COOK, S. J.; KOUKOULOS, I.; EDWARDS, L. A.; DORTCH, J.; HOFFMANN, D. Glacier change and glacial lake outburst flood risk in the Bolivian Andes. **The Cryosphere**, v.10, n.5, pp. 2399–2413, 2016.
- FISCHER, A.; HELFRICHT, K.; WIESENEGGER, H.; HARTL, L.; SEISER, B.; STOCKER WALDHUBER, M. Chapter 9 - What Future for Mountain Glaciers? Insights and Implications From Long-Term Monitoring in the Austrian Alps. In: GREENWOOD, Gregory B.; SHRODER, J.F. **Developments in Earth Surface Processes**, v. 21, p.325-382, 2016.
- GAIKWAD, D.; GUHA, S.; TIWARI, R. K. Monitoring Spatiotemporal Patterns of Glacial Lakes in the Eastern Himalayas Using Satellite Data and Nonparametric Statistical Testing Techniques. In: **Handbook of Himalayan Ecosystems and Sustainability**, v. 2, nov. 2022.
- GAIKWAD, D.; KUMAR, M.; TIWARI, R. K.; GUHA, S. Glacial Lake Dynamics and Outburst Flood Hazard Assessment of Glacial Lakes in Sikkim Himalaya using AHP and FAHP Multi-Criteria Decision-Making Methods. **Conference**, 2022.
- HAEBERLI, W.; LINSBAUER, A.; COCHACHIN, A.; SALAZAR, C.; FISCHER, U. H. On the morphological characteristics of overdeepenings in high-mountain glacier beds. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.41, n.13, p. 1980–1990, 2016.
- HAEBERLI, Wilfried; WHITEMAN, Colin. Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters: A General Framework. In: **Hazards and Disasters Series, Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters**, 2.ed. p. 165-198, 2021.
- HU, J.; YAO, X.; DUAN, H.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; WU, T. Temporal and Spatial Changes and GLOF Susceptibility Assessment of Glacial Lakes in Nepal from 2000 to 2020. **Remote Sensing**, 2022.
- HUGGEL, C.; HAEBERLI, W.; KÄÄB, A.; BIERI, D.; RICHARDSON, S. (2004) An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. **Canadian Geotechnical Journal**, v.41, p. 1068–1083.
- ITURRIZAGA, L. Glacier Lake Outburst Floods. In: SINGH, V.P.; SINGH, P.; HARITASHYA, U.K. Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. **Springer**. p 381–399, 2011.
- KOUKOULOS, I. Glacial lake outburst flood risk in the Bolivian Andes. **Manchester Metropolitan University**, 2019.
- LAFRENIERE, J.; MARK, B.G. A review of methods for estimating the contribution of glacial meltwater to total watershed discharge Prog. **Phys. Geogr.**, v.38, n.2, p. 173-200, 2014.
- MARK, B.G.; MCKENZIE, J.M. Tracing increasing tropical Andean glacier melt with stable isotopes in water Environ. **Sci. Technol.**, v.41, pp. 6955-6960, 2007.
- MERGILI, M.; SCHNEIDER, J. F. Regional-scale analysis of lake outburst hazards in the southwestern Pamir, Tajikistan, based on remote sensing and GIS. **Natural Hazards and Earth System Science**, v.11, n.5, p. 1447–1462, 2011.
- MUÑOZ, R. et al. (2016). Managing Glacier Related Risks Disaster in the Chucchún Catchment, Cordillera Blanca, Peru. In: Salzmann, N., Huggel, C., Nussbaumer, S., Ziervogel, G. (eds) **Climate Change Adaptation Strategies – An Upstream-downstream Perspective**. Springer, Cham.
- PAYNE, L.B.; SHEPARDON, D.P. Practitioners' views on useful knowledge for climate change adaptation projects Sustain. **Dev.**, v.23, pp. 355-368, 2015.
- POUYAUD, B.; ZAPATA, M.; YERREN, J.; GOMEZ, J.; ROSAS, G.; SUAREZ, W.; RIBSTEIN, P. On the future of the water resources from glacier melting in the Cordillera Blanca, Peru. **Hydrol. Sci. J.**, v.50, p. 999-1022, 2005.
- QI, M. M. et al. Improving the accuracy of glacial lake volume estimation: A case study in the Poiqu basin, central Himalayas. **Journal of Hydrology**, 2022.

-
- RIBEIRO, Rafael da Rocha. **Geleiras tropicais na América do Sul e as variações climáticas da Bacia Amazônica Ocidental**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2014.
- RICHARDSON, S.D.; REYNOLDS, J.M. An overview of glacial hazards in the Himalayas. **Quaternary International**, v.65, p.31–47, 2000.
- ROUNCE, D. R. et al. Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters. **Science**, 2023, v. 379, p. 78-83. DOI: 10.1126/science.abo1324.
- SCHOOLMEESTER, T. et al. Atlas de Glaciares y Aguas Andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. **UNESCO y GRID-Arendal**, 2018.
- SHUKLA A.; GARG P.K.; SRIVASTAVA, S. Evolution of Glacial and High-Altitude Lakes in the Sikkim, Eastern Himalaya Over the Past Four Decades (1975-2017). **Front. Environ. Sci.** v.6, p.81, 2018. Disponível em: doi: 10.3389/fenvs.2018.00081.
- SORUCO, A.; VINCENT, C.; RABATEL, A.; FRANCOU, B.; THIBERT, E.; SICART, J.E.; CONDOM, T. Contribution of glacier runoff to water resources of La Paz city, Bolivia (16°S). **Ann. Glaciol.**, v.56, n.70, p. 147-154, 2015.
- VUILLE, Mathias et al. Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes - Impacts, uncertainties and challenges ahead. **Earth-Science Reviews**, v.176, p. 195–213, 2018.
- WANG, S.; QIN, D.; XIAO, C. Moraine-dammed lake distribution and outburst flood risk in the Chinese Himalaya. **Journal of Glaciology**, v.61, n.225, p. 115–126, 2015.
- WANG, W.; YAO, T.; GAO, Y.; YANG, X.; KATTEL, D. B. A First-order Method to Identify Potentially Dangerous Glacial Lakes in a Region of the Southeastern Tibetan Plateau. **Mountain Research and Development**, v.31, n.2, p. 122–130, 2011.
- WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M.; HASSAN, M. A. A. M.; LOWE, A. Numerical modelling of glacial lake outburst floods using physically based dam-breach models, **Earth Surf. Dynam.**, v.3, p.171–199, doi:10.5194/esurf-3-171-2015, 2015.
- WILSON, R.; GLASSER, N.F.; REYNOLDS, J.M.; HARRISON, S.; ANACONA, P.I.; SCHAEFER, M.; SHANNON, S. Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes. **Global and Planetary Change**, v.162, p.275–291, 2018.
- WORN, R. et al. Analysis and dynamic modeling of a moraine failure and glacier lake outburst flood at Ventisquero Negro, Patagonian Andes (Argentina). **Journal of Hydrology**, p. 134-145, 2012.
- ZHANG, D. et al. A robust glacial lake outburst susceptibility assessment approach validated by GLOF event in 2020 in the Nidu Zangbo Basin, Tibetan Plateau. **Catena** v. 220, Parte B, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106734>.