

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Fyzická geografie a geoinformatika



Michal Dobíhal

ÚSTUP LEDOVCŮ V POHOŘÍ CORDILLERA BLANCA

OD MALÉ DOBY LEDOVÉ

**THE GLACIAL RETREAT IN THE CORDILLERA BLANCA SINCE THE
LITTLE ICE AGE**

Bakalářská práce

Vedoucí práce, školitel: Doc. RNDr. Vít Vilímek, CSc.

Praha 2016

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 30. 6. 2016

Podpis:

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu práce a školiteli Doc. RNDr. Vítu Vilímkovi, CSc. za cenné rady, náměty, připomínky a materiály, které mi poskytl při vypracovávání této práce.

Děkuji Ing. Markétě Potůčkové, Ph.D. za cenné rady a náměty.

Děkuji svým rodičům a přátelům za neustálou podporu.

ZADÁNÍ PRÁCE

Název práce

Ústup ledovců v pohoří Cordillera Blanca od Malé doby ledové

Cíle práce

Hlavním cílem práce je provést literární rešerši na výše uvedené téma, a to za účelem poznání problematiky a rozsahu zalednění v jihoamerickém pohoří Cordillera Blanca především v zahraniční literatuře. V rešerši bude popsáno časové zařazení Malé doby ledové v Jižní Americe oproti světu, metodika lichenometrie využívaná k datování morén, změna rozsahu zalednění v pohoří Cordillera Blanca v průběhu 20. století. Součástí bude rovněž vlastní zhodnocení změny rozlohy zalednění na vybraných ledovcích s lichenometricky datovanými morény od Malé doby ledové dodnes pomocí satelitních snímků a extrapolace této metody zhodnocení na jiné vybrané ledovce, u nichž nebyly morény dosud datovány.

Použité pracovní metody, zájmové území

Metody: Studium odborné literatury, polygonové měření nad satelitními snímky v aplikaci Google Earth Pro

Zájmové území: Zaledněná oblast jihoamerického pohoří Cordillera Blanca

Datum zadání: 21. 1. 2016

Jméno studenta: Michal Dobíhal

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: Doc. RNDr. Vít Vilímek, Csc.

Podpis vedoucího práce:

Ústup ledovců v pohoří Cordillera Blanca od Malé doby ledové

ABSTRAKT:

Malá doba ledová je označení pro období výrazného ochlazení oproti dlouhodobému průměru, v jehož důsledku došlo k poměrně významné expanzi horských ledovců v mnoha částech světa. Konvenčně se udává období od 16. století do poloviny 19. století, ale průběh a přesné časové zařazení se v jednotlivých světových regionech různí. Cílem této práce je popsat časové zařazení Malé doby ledové v jihoamerickém pohoří Cordillera Blanca a rozsah ústupu zdejšího zalednění od jejího maxima dodnes, a to formou rešerše odborné literatury. V práci je dále představena metodika lichenometrie užívaná k datování morén vytvořených během Malé doby ledové. Ve vlastní výzkumné části je pak pomocí polygonového měření nad satelitními snímky provedeno porovnání rozsahu zalednění z maxima Malé doby ledové a současnosti nad vybranými ledovci s datovanými morény a následně je provedena extrapolace této metody na jiné vybrané ledovce, u kterých nebyly morény dosud datovány.

Klíčová slova: Cordillera Blanca, Malá doba ledová, ústup zalednění, moréna, lichenometrie

The glacial retreat in the Cordillera Blanca since the Little Ice Age

ABSTRACT:

The term Little Ice Age refers to a cooling period of time, as a result of this cooling mountain glaciers experienced significant advance in many parts of the world. Conventionally, the period between the 16th century and the middle of the 19th century is stated for the Little Ice Age, but its course and time placement differs in individual world regions. Based on research of scientific literature, this thesis aims at describing correct time placement of the Little Ice Age in the southamerican mountain range Cordillera Blanca and the expanse of the glacier retreat since its maximum till the present. Methods of lichenometry used for dating „Little Ice Age“ moraines are mentioned as well. In the analytical part, the area of the glaciation of selected glaciers from the Little Ice Age maximum and from the present is compared using polygon measurement and satellite images. The extrapolation of this method is subsequently made on other selected glaciers, whose moraines have not been dated yet.

Keywords: Cordillera Blanca, Little Ice Age, glacial retreat, moraine, lichenometry

Obsah

Obsah	6
1 Úvod	10
2 Fyzickogeografická charakteristika pohoří Cordillera Blanca	12
2.1 Poloha a geologická stavba	12
2.2 Hydrologické poměry	12
2.3 Klimatické poměry	13
2.4 Střední sněžná čára	14
3 Ledovec a ledovcová činnost	16
3.1 Ledovec	16
3.2 Ledovec jako systém	16
3.3 Typy ledovců	17
3.3.1 Pevninské ledovce	17
3.3.2 Plošné ledovce	17
3.3.3 Horské ledovce	17
3.4 Typy horských ledovců	17
3.4.1 Údolní ledovec	18
3.4.2 Karový ledovec	18
3.4.3 Dendritický ledovec	18
3.4.4 Podhorský (piedmontní) ledovec	18
3.5 Klasifikační systém ledovců WGMS a GLIMS	18
3.6 Definice ledovce v DPZ	19
3.7 Erozní činnost ledovců	21
3.8 Morény	21
3.9 Typy morén	22
3.9.1 Boční moréna	22
3.9.2 Čelní moréna	22
3.9.3 Střední moréna	22
3.9.4 Vnitřní moréna	23
4 Malá doba ledová	24
4.1 Obecná charakteristika	24
4.2 Vliv Malé doby ledové na společnost	25
4.3 Zdroje dat a metody datování	25
4.4 Malá doba ledová v Evropě	26

4.5	Malá doba ledová ve světě	27
4.6	Malá doba ledová v Jižní Americe	28
4.7	Malá doba ledová v pohoří Cordillera Blanca	29
4.8	Možné příčiny Malé doby ledové	31
5	Lichenometrie	32
5.1	Lichenometrie a lišejníky	32
5.1.1	Obecné informace	32
5.1.2	Lišejníky	32
5.1.3	Mapovník zeměpisný	33
5.2	Metody měření	33
5.2.1	Měření velikosti stélky	34
5.2.2	Výběr stélky	34
5.2.3	Metoda GEV	35
5.3	Křivka růstu	35
5.3.1	Přímá a nepřímá metoda	35
5.3.2	Tvar křivky	35
5.3.3	Faktory ovlivňující rychlost růstu	36
5.3.4	Nedostatky lichenometrie	37
5.4	Využití Lichenometrie ve světě	37
5.4.1	Příklady využití	37
5.4.2	Využití Lichenometrie ve Washington State, USA	37
5.4.3	Využití Lichenometrie ve Švýcarsku	37
5.4.4	Využití Lichenometrie na Aljašce a Kamčatce	38
5.5	Využití Lichenometrie v Jižní Americe	39
5.5.1	Využití Lichenometrie v Chile	39
5.5.2	Využití Lichenometrie v pohoří Cordillera Real, Bolívie	40
5.6	Využití Lichenometrie v pohoří Cordillera Blanca	41
5.6.1	Výzkumy z let 1996 a 2002	41
5.6.2	Metodika měření	42
5.6.3	Stanovení nových kontrolních bodů	42
5.6.4	Křivka růstu	43
5.6.5	Časový rozdíl mezi klimatickou změnou a reakcí ledovce	45
5.6.6	Stáří datovaných morén	45
5.6.7	Rekalibrace pomocí metody GEV z roku 2007	46

5.6.8	Porovnání s výzkumem v pohoří Cordillera Real	47
6	Ústup zalednění v pohoří Cordillera Blanca	48
6.1	Zalednění v pohoří Cordillera Blanca	48
6.2	Rozsah zalednění podle leteckých snímků z roku 1970	48
6.3	Porovnání změny rozsahu zalednění mezi lety 1970 a 2003	49
6.3.1	Změna rozlohy ledovců	49
6.3.2	Změna nadmořské výšky ledovců	50
6.4	Rozsah zalednění podle satelitních snímků z roku 2010	51
6.5	Vzdálenost ústupu čel ledovců	53
6.6	Ústup střední sněžné čáry	53
6.7	Vliv ústupu zalednění na vodní režim v regionu Cordillera Blanca	54
6.7.1	Vývoj odtoku	54
6.7.2	Povodí horního toku řeky Río Santa	55
7	Metodika práce	56
7.1	Rešerše odborné literatury	56
7.2	Metodika vlastní analýzy vybraných ledovců	56
7.2.1	Volba software	56
7.2.2	Zdroje dat	58
7.2.2.1	Poskytovatelé satelitních snímků	58
7.2.2.2	Přesnost snímků	58
7.2.2.3	Použité snímky	60
7.2.3	Metodika polygonového měření ledovců	60
7.2.3.1	Popis měření dat	61
7.2.3.2	Kontrolní polygonové měření	61
7.2.3.3	Identifikace konkrétních morén z maxima Malé doby ledové	63
7.2.3.4	Měření ledovců pomocí polygonů	64
7.2.3.5	Dodatečná pozorování	65
7.2.4	Extrapolace metody polygonového měření na ledovce bez datovaných morén	65
8	Výsledky vlastní analýzy vybraných ledovců	67
8.1	Úbytek plochy ledovců	67
8.2	Rychlost úbytku plochy ledovců	68
8.3	Výškový ústup čela ledovce	69
8.4	Vzdálenost ústupu čela ledovce	70
8.5	Úbytek podle typu ledovce	70

9	Diskuze	72
9.1	Srovnání výsledků analýzy s jinými studiemi	72
9.2	Potenciální chyby v průběhu analýzy	74
9.3	Návrhy pro budoucí využití metody	76
10	Závěr	77
11	Citovaná literatura	80
12	Seznam obrázků	87
13	Seznam tabulek	87
14	Elektronické zdroje	87
15	Přílohy	88

1 Úvod

Bakalářská práce sestává ze dvou základních částí, a sice rešeršní části a části praktické, kde je provedena vlastní analýza dat o vybraných ledovcích. Hlavním cílem rešeršní části práce je obsáhnout dosavadní poznání o ústupu ledovců v pohoří Cordillera Blanca od maxima Malé doby ledové, tedy přibližně v posledních 400 letech. Komplexního a souhrnného obrazu o vývoji situace v zájmovém regionu je dosaženo za pomoci rešerší souvisejících témat, která tvoří vedlejší náměty rešeršní části práce. Nejdůležitějšími z nich jsou témata Malé doby ledové a lichenometrie, mezi další patří fyzickogeografická charakteristika pohoří Cordillera Blanca a problematika klasifikace ledovců. Hlavním cílem analytické části práce je kvantifikovat ústup ledovců od maxima Malé doby ledové na vybraných ledovcích s datovanými morény pomocí polygonového měření a následně se pokusit tuto metodu extrapolovat na ledovce bez datovaných morén. Vedlejším cílem je doplnit informaci o úbytku rozlohy ledovců dalšími parametry ústupu ledovců jako je vzdálenost ústupu čela ledovce, výškový ústup čela ledovce a další. V neposlední řadě je snahou vlastní výsledky porovnat s výsledky jiných studií.

Malá doba ledová bylo období v nedávné minulosti, kdy přibližně v průběhu 16. až 19. století došlo v různých světových regionech k ochlazení klimatu oproti dlouhodobému průměru, následkem čehož došlo mnohdy k významnému nárůstu ledovců (Mann, 2002). Periody ochlazení se ovšem u všech oblastí neshodují a různí se region od regionu. Konec Malé doby nastává během konce 19. století a počátkem 20. století především kvůli zvýšené lidské činnosti, tedy nadměrné spotřebě fosilních paliv a na to vázané nadprodukci skleníkových plynů (Bradley a kol., 1993). Výrazný nárůst ledovců během Malé doby ledové lze pozorovat v severozápadní Evropě (Briffa a kol., 1990), v evropské části Ruska (Borisencov, 1992) i na Kamčatce (Solomina a kol., 1995), ve Švýcarsku a v celém alpském regionu (Pfister, 1995), v Severní Americe (Bradley a kol., 1993) včetně Aljašky (Solomina a kol., 2003), v Chile (Winchester a kol., 2000), v Bolívii (Rabatel a kol., 2005), v Peru (Rodbell, 1992; Solomina a kol., 2007) a v menší míře i ve Východní Asii (Kim, 1984).

V kapitole 2 je ve stručnosti popsána fyzickogeografická charakteristika zájmového území pohoří Cordillera Blanca. Následně jsou v kapitole 3 souhrnně vysvětleny základní pojmy vztahující se k problematice ledovců, jejich dynamiky a erozní činnosti. Kapitola 4

obsahuje rešerši literatury na téma časového zařazení Malé doby ledové s podrobnějším zaměřením na jihoamerický region (Rabatel a kol., 2005; Grove, 1988; Winchester a kol., 2000) a především na peruánské pohoří Cordillera Blanca (Rodbell, 1992; Solomina a kol., 2007; Jomelli a kol., 2007). V kapitole 5 je popsána jedna z tradičních a často používaných metod datování stáří tvarů reliéfu lichenometrie. Nejprve je zde vysvětleno, na jakých principech funguje a jaké jsou její limity (Armstrong, 2004; Jomelli a kol., 2007) a následuje rešerše využití lichenometrie ve světě (Porter, 1981; Harrison a kol., 2000) opět se zaměřením na jihoamerický region a pohoří Cordillera Blanca. Zvláštní pozornost je pak věnována studii, její metodice a jejím výsledkům (Solomina a kol., 2007), z které byly využity poznatky a vybrané ledovce pro vlastní srovnávací část práce.

Od konce Malé doby ledové dochází k ústupu naprosté většiny horských ledovců. Nejvýrazněji a nejrychleji ustupují tropické ledovce, které dosahují mnohonásobně menších rozměrů než ledovce z mírných šířek, díky čemuž reagují na změnu klimatu velice rychle v řádu několika málo let (Kaser a kol., 1990). V tropických Andách se v současnosti nachází 99 % tropických ledovců, z toho jich je přibližně 72 % v Peru a nejrozsáhleji zaledněné peruánské pohoří je Cordillera Blanca (Rabatel a kol., 2013). Zdejší ledovce nejsou v rovnováze se současným zdejším klimatem a jsou na výrazném ústupu. Podle modelových studií by mohly ledovce do roku 2080 z některých povodí zcela zmizet, což bude mít drastické následky na odtok a následně na ekonomiku a obyvatelstvo země (Juen a kol., 2007), neboť zdejší ledovce jsou nejvýznamnějším zdrojem pitné i užitkové vody, proto je co nejdetailnější pochopení historie a dynamiky těchto tropických ledovců pro zdejší obyvatelstvo klíčové. Cílem kapitoly 6 je tedy popsat ústup ledovců v pohoří Cordillera Blanca od maxima Malé doby ledové do současnosti.

V kapitole 7 je pak popsána metodika práce, především je zde vysvětleno, jak byla provedena vlastní analýza změny rozlohy vybraných ledovců mezi maximem Malé doby ledové a současností pomocí polygonového měření nad satelitními snímky v aplikaci Google Earth Pro. Následně byla provedena extrapolace této metody na jiné vybrané ledovce bez datovaných morén a výsledky jsou porovnány mezi sebou v kapitole 8, v kapitole 9 jsou pak výsledky diskutovány s výsledky jiných studií.

2 Fyzickogeografická charakteristika pohoří Cordillera Blanca

2.1 Poloha a geologická stavba

Cordillera Blanca je pohoří nacházející se v regionu Ancash v severním Peru mezi 8° 08' a 9° 58' j. š., a 77° 00' a 77° 52' z. d. Pohoří je součástí Peruánských And a směřuje přibližně od severozápadu k jihovýchodu. Na délku má okolo 200 km a v nejširším bodě měří 28 km na šířku (Chacón, 2014). Pohoří bylo vyvrásněno společně s celými Andami díky subdukci desky Nazca pod Jihoamerickou desku. Pohoří je téměř celé tvořeno pozdní jurskou Chicama formací, která byla intrudována během Miocénu granodioritem (Wise a kol., 2003). Dnes se tedy pohoří skládá především z batolitu, který je tvořen právě miocenním granodioritem a dosahuje rozměrů okolo 200 km na délku a 20 km na šířku (Giovanni a kol., 2010). Od sousedního hřebene Cordillera Negra je Cordillera Blanca oddělena zlomem, který má také směr od severozápadu k jihovýchodu, až na místo zvané San Cristóbal turtleback, kde zlom lokálně mění svůj směr o 90° (Bonnot, 1984). Zdvihnuté kry byly fluviálně a následně glaciálně erodovány a vzniklo tak mnoho ledovcově přeměněných údolí ve tvaru „U“. Erovaný materiál byl částečně odnesen do pánve na dně Callejon de Huaylas, údolí kopírujícího linii zlomu, kde tvoří glaciofluviální sedimenty, částečně z něho vznikly mohutné čelní a boční morény (Paulo, 1980).

Jedná se o nejvyšší a nejvíce zaledněné tropické pohoří na světě. Nejvyšší hora se nazývá Huascarán a dosahuje výšky 6 768 m n. m. a nachází se zde dalších 25 vrcholů vyšších než 6000 m n. m. (Lemke, 2004) a okolo 30 - 40 vrcholů nad 5 500 m n. m (Chacón, 2014), podle některých zdrojů je jich více jak 50 (Lemke, 2004).

2.2 Hydrologické poměry

Pohoří je součástí kontinentálního rozvodí, kdy Río Santa na západě ústí do Tichého oceánu, zatímco Río Marañón ústí na východě do Atlantického oceánu jako levá zdrojnice Amazonky. Hlavním pramenem Río Santa je jezero Qunuqqucha nacházející se ve výšce 4 050 m n. m. Řeka pak teče 200 km severním směrem údolím Callejon de Huaylas. Z pohoří Cordillera Blanca se do Río Santa připojuje několik pravých přítoků, například Río Yanayacu,

Río Negro, Río Quilca nebo Río Llullan (Ramírez, 2011). Velká část vody pochází z tajících ledovců a především v období sucha, od května do září, je v řece velmi malý průtok, který nestačí pokrývat potřeby pitné a zavlažovací vody v regionu, voda z ledovců je zde tedy životně důležitá (Burns a kol., 2013). Nachází se zde 830 identifikovaných ledovcových jezer různých velikostí (Palacios a kol., 2014). 514 z těchto jezer se nachází v povodí Río Santa a voda z nich odtéká do Pacifiku, všech 514 jezer má plochu větší než 5 000 m² (Portocarrero Rodríguez, 2014). Jezera hrazená morénymi zde neustále vznikají a zanikají s mnohdy tragickými následky pro místní obyvatelstvo.

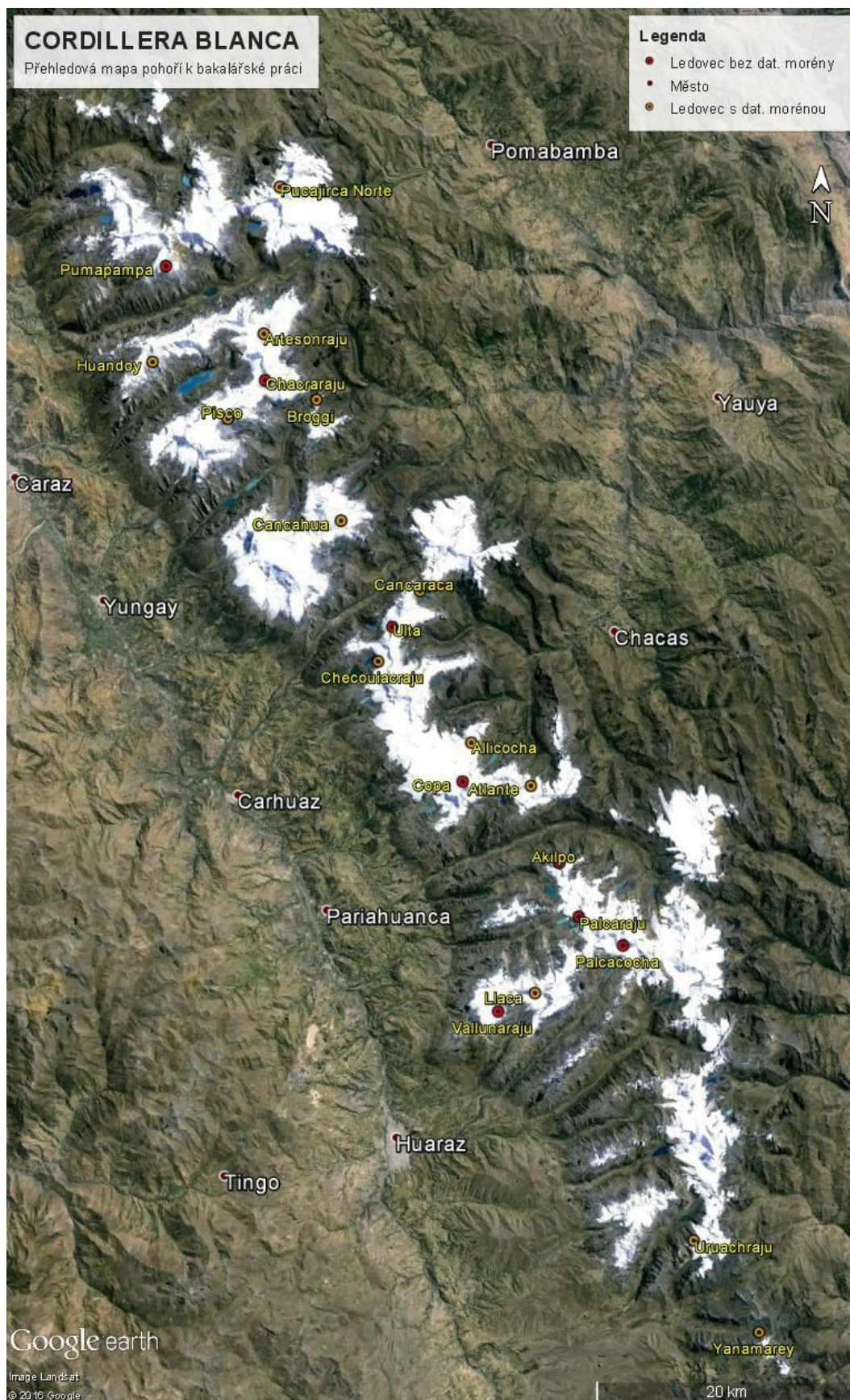
2.3 Klimatické poměry

Díky své poloze a tvaru tvoří pohoří Cordillera Blanca výraznou přirozenou klimatickou bariéru, kdy stojí v cestě stálému východnímu proudění vzduchu, a odděluje tak vlhkou návětrnou stranu Amazonie na východě a suchou závětrnou stranu pacifického pobřeží na západě (Kaser a kol., 1997). V údolí řeky Río Santa na západě pohoří Cordillera Blanca se srážky pohybují v ročních průměrech od hodnoty 180 mm/rok v Carazu (2 286 m n. m.) do maximální hodnoty 750 mm/rok v Ticapampa (3 480 m n. m.), (pro období 1950-1980) (Niedertscheider, 1990). Oproti tomu srážky na východních svazích pohoří Cordillera Blanca se pohybují mírně nad 3 000 mm/rok, přičemž 70 – 80 % těchto srážek spadne mezi říjnem a dubnem (Kaser a kol., 2003).

Klimaticky se Cordillera Blanca nachází ve vnější části tropického podnebného pásu, kde je charakteristická minimální změna teploty v průběhu roku. Mezi lety 1954-1987 se výkyvy průměrné teploty vzduchu v průběhu roku pohybovaly do 2 °C (Kaser a kol., 2002). Naopak je zde výrazná sezónnost v chodu srážek, kdy lze rozeznat v průběhu roku 1 období dešťů, které nastává přibližně od října do dubna, a 1 období sucha, trvající od května do září. K akumulaci sněhu tak dochází převážně v období dešťů ve vyšších nadmořských výškách. Isotherma 0 °C pro dny se srážkami se již přibližně od roku 1980 pohybuje okolo 5 100 m n. m. s malými odchylkami, v tyto dny tedy nad touto hranicí padají srážky sněhové a mohou se tak postupně přetvořit v novou ledovcovou hmotu (Schauwecker a kol., 2014).

2.4 Střední sněžná čára

Po dlouhou dobu jediný výzkum výšky střední sněžné čáry v tomto pohoří se vztahoval k období 1930 - 1950 pro masiv Santa Cruz – Alpamayo - Pucahirca a výsledek se pohyboval mezi 4900 – 5050 m n. m., přičemž za sledované období střední sněžná čára vystoupala v průměru přibližně o 40-50 metrů (Kaser a kol., 1997). Jiný výzkum, který sledoval změnu střední sněžné čáry na trojici hor Santa Cruz - Huascarán - Huandoy mezi lety 1987 - 2014 pomocí DPZ, zjistil výšky střední sněžné čáry mezi 4851,4 – 5095,6 m n. m. s pozitivním trendem růstu v čase (Paraj, 2015). Lze tedy říci, že střední sněžná čára, nad kterou dochází k přeměně spadaneého sněhu v led a akumulaci hmoty ledovce, se v pohoří Cordillera Blanca nachází přibližně mezi 4850 – 5 100 m n. m. a dlouhodobě lze pozorovat její pohyb do vyšších poloh.



Obrázek 1. Pohoří Cordillera Blanca, Peru s vybranými ledovci zmíněnými v práci

3 Ledovec a ledovcová činnost

3.1 Ledovec

Ledovec je nehomogenní přírodní těleso tvořené ledem, které vzniká nad sněžnou čarou. V území s negativní tepelnou bilancí sních v průběhu léta neroztaje a postupně se mění ve firnový sních s hustotou asi okolo $0,5 \text{ g/cm}^3$ (Paterson, 1994), firnový led a nakonec ledovcový led. Tento vývoj probíhá díky regelaci, což je proces opakovaného částečného tání a následného mrznutí spolu s tlakovým působením nadložních vrstev (Anderson, 2004). Výsledná hustota ledovcového ledu se pak dle konkrétních podmínek pohybuje velmi blízko $0,92 \text{ g/cm}^3$ (Shumskiy, 1959) a má podstatně jinou strukturu od ledu vzniklého zmrznutím vody, zrna ledovcového ledu mají charakter jednoosých krystalů. Jak roste objem ledovcové hmoty, je ledovec z místa svého vzniku vytlačován a gravitačně přesouván až pod sněžnou čáru, kde postupně odtává (Horník, 1986).

3.2 Ledovec jako systém

Ledovec, nehledě na jeho různé rozměry, lze ale také chápat jako systém. Systém je vždy charakterizován jednak vstupy a výstupy, tak i procesy ukládání, transportu a přeměny hmoty a energie procházejících daným systémem. To ledovce splňují stejně tak, jako dynamiku systému, ledovce se neustále přizpůsobují klimatickým změnám vyvažováním vstupů a výstupů (Anderson, 2004).

Vstupním materiálem je především sních, padající buď přímo ze sněhových srážek, nebo jako laviny z okolních svahů. V malém množství pak přispívá ještě déšť se sněhem, kroupy a déšť mrznoucí na povrchu či uvnitř ledovce. Přírůstek ledovcové hmoty se nazývá akumulace. Dalším vstupním materiálem jsou kamenné úlomky různých velikostí, které do systému vstupují díky zvětrávacím procesům a erozní činnosti ledovce (Pidwirny, 2006).

Hmota ledovce ubývá především díky povrchovému tání, tání uvnitř ledovce a na jeho bázi, tvořící výstup ze systému v podobě odtékající roztáté vody. Další výstup se může uskutečňovat pomocí evaporace, tedy sublimace ledu přímo ve vodní páru, nebo větrným odnosem sněhu z povrchu ledovce, či telením ledovce. Úbytek ledovcové hmoty se nazývá

ablace (Anderson, 2004). Suť a kamenné úlomky vystupují ze systému v podobě tillu a následně morén nebo jsou dále přepracovávány glaciofluvialními procesy (Pidwirny, 2006).

Jako každý jiný systém, ledovce mají také energetické vstupy a výstupy. Klima Země je poháněno Sluncem a ani ledovce by neexistovali, pokud by se díky sluneční energii neodpařovala voda z oceánů, která pak tvoří sněhové srážky ve vysokých nadmořských výškách a zeměpisných šířkách. A sluneční energie, někdy společně s energií geotermální, je pak velmi důležitá pro tání ledovce. Další vloženou energií je potenciální energie, která je přetvořena v energii kinetickou při pohybu ledovce údolím dolů (Anderson, 2004).

3.3 Typy ledovců

Podle velikosti a reliéfu lze rozlišit ledovce pevninské, plošné a horské (Horník, 1986).

3.3.1 Pevninské ledovce

Pevninské ledovce jsou velké masy ledu pokrývající většinu svého pevninského podloží, dosahují mocnosti až 4 000 m a v současnosti se nacházejí pouze na Antarktidě a v Grónsku, kde pokrývají zhruba 14 mil. km² (Bentley a kol., 2007).

3.3.2 Plošné ledovce

Plošné ledovce mají nejčastěji tvar kupole s radiálním směrem pohybu ledu a nacházejí se ve vrcholových oblastech plochých hornatin. Dnes se nachází například v severní Skandinávii, na Islandu, nebo v Patagonii (Zemp a kol., 2007).

3.3.3 Horské ledovce

Horské ledovce vyplňují deprese a údolí horských masivů. Mocnost horského ledovce se pohybuje od desítek metrů po ty nejmocnější s maximální mocností okolo 1 000 metrů. Dnes lze najít různé typy horských ledovců například v Norsku, evropských Alpách, v Himalájích, Pamíru, Ťan-Šanu, Patagonii či Novém Zélandu (Zemp a kol., 2007).

3.4 Typy horských ledovců

Podle reliéfu a celkového stupně zalednění lze dále rozlišit několik typů vysokohorských ledovců.

3.4.1 Údolní ledovec

Údolní ledovec vyplňuje vyšší část horských údolí a má dobře vyvinutou vyživovací oblast a ledovcový jazyk. Údolní ledovce najdeme velmi často v Alpách, proto někdy bývá označován jako typ alpský. Typickým příkladem je největší ledovec Alp, Aletschský ledovec o rozloze 81,7 km² (Holzhauser a kol., 2011).

3.4.2 Karový ledovec

Karový ledovec vyplňuje vysoko položené deprese - kary (vyživovací oblasti) na údolních svazích a nemá typický ledovcový jazyk. V některých případech zůstává na svahu zavěšen krátký ledovcový splaz, takový ledovec se pak označuje jako svahový a je typický například pro Himaláje, Alpy, či ledovec Martial v Jižních Andách v Argentině (Planas a kol., 2002).

3.4.3 Dendritický ledovec

Dendritický ledovec má více vyživovacích oblastí po obou stranách údolí, z obou svahů splývají ledovcové jazyky, které se spojují s hlavním ledovcem. Tento typ se nachází především ve vysokých asijských pohořích, jako příklad lze uvést Fedčenkův ledovec v Pamíru, jehož současná rozloha se pohybuje okolo 120 – 150 km² a dosahuje délky 77 kilometrů (Lambrecht a kol., 2014).

3.4.4 Podhorský (piedmontní) ledovec

Podhorský (piedmontní) ledovec se nachází v oblastech silného vývoje dendritických ledovců, které přestupují přes sedla a rozvodní hřbety do sousedních údolí, což se nazývá ledovcovou transfluencí. Ledovce ze sousedních údolí se při výstupu z hor spojují v jeden mohutný ledovcový krunýř, příkladem může být nejrozsáhlejší piedmontní ledovec Malaspina na Aljašce, který dosahuje rozlohy okolo 5 000 km² (Molnia, 2005).

3.5 Klasifikační systém ledovců WGMS a GLIMS

Správná a detailní klasifikace ledovce je zcela nezbytnou součástí prostorové analýzy ledovců pomocí satelitních a leteckých snímků. K tomu aby byla obsáhnuta velká geomorfologická rozmanitost ledovců a dosáhlo se sjednocení jejich klasifikace, ustanovila WGMS (World Glacier Monitoring Service) obecnou terminologii a na jejím základě vytvořila klasifikační systém. Je nutné dodat, že klasifikačních systémů ledovců existuje mnoho, společnou mají snahu zachytit vnitřní dynamiku ledovce, jeho aktuální stav vývoje a okolní

klimatické podmínky. Toho je většinou dosaženo popisem morfologických a teplotních vlastností ledovce (Rau a kol., 2005).

Klasifikační systém WGMS byl představen v roce 1970, s cílem rychle a přesně charakterizovat morfologii ledovců, přičemž je charakterizováno více vlastností najednou. Toho je dosaženo hodnocením 6 klíčových parametrů, které byly následně ještě rozšířeny, u každého klasifikovaného ledovce. Jedná se o parametry jako základní typ ledovce, charakteristika čela ledovce, hlavní vyživovací zdroj ledovce, aktivita ledovcového splazu, výskyt a parametry morén a další. Každému parametru je přiřazena určitá hodnota z daného rozpětí hodnot, tak aby byl daný parametr u konkrétního ledovce popsán co nejpřesněji. Jedná se tedy o maticový typ klasifikace, který umožňuje rychlou, flexibilní a přesto velmi přesnou charakterizaci ledovců pomocí satelitních snímků (Rau a kol., 2005).

GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space) je projekt, který má za úkol monitorovat světové ledovce pomocí dálkového průzkumu Země umožněného díky snímkům z družic. Tento projekt nejčastěji využívá data ze senzoru ASTER neseného družicí Terra. V současnosti se jedná o největší a nejpodrobnější databázi světových ledovců, obsahující přibližně 200 000 záznamů (Serreze, 2005). Pro svou databázi využívají upravený a vylepšený klasifikační systém WGMS.

3.6 Definice ledovce v DPZ

Po dlouhou dobu hodnotili různí autoři vlastnosti ledovců různě, každý do samotného tělesa ledovce počítal něco jiného, někdo bral za součást ledovce i oblasti vytrvalého sněhu nebo nunataky vystupující z ledovce. Postupem času se rozhodlo, že je pro účely GLIMS nutné zavést standardizovanou definici ledovce, aby byly jednotlivé objekty v databázi vytvořené pouze podle jednoho postupu a mohly být mezi sebou vzájemně bezproblémově analyzovány. Hlavními cíli bylo stanovit jednak, jak se mají správně vytyčit hranice ledovce a kdy ledovec rozdělit na více těles, a následně co ještě je a co už není ledovcová hmota. Je nutné dodat, že následující definice je přizpůsobená dálkovému průzkumu Země a byla vytvořena primárně pro účely GLIMS.

Ledovec nebo věčná masa sněhu, se skládá z těla z ledu a sněhu pozorovaného na konci sezóny tání, nebo u ledovců v tropickém pásmu po roztátí přechodné sněhové

pokrývky. V tom jsou zahrnuty všechny připojené přítoky a oblasti, které přispívají ledem do hlavního ledovce, plus všechny partie pokryté horninovou sutí. Vyloučen je všechn odkrytý terén včetně nunataků. Šelfový ledovec je považován za samostatný ledovec (Raup a kol., 2010).

V důsledku této definice, je při vytyčování ledovce nutné dávat pozor na několik věcí. Mezi základní pravidla patří:

- Část těla ledovce nad hraniční rozsedlinou mezi firnovištěm a ledovcovým splazem je součástí ledovce, neboť zásobuje ledovec sněhem a ledem.
- Přítoky k hlavnímu ledovci by neměly být v rámci GLIMS považovány za samostatné ledovce, ale za součást hlavního ledovce, do kterého přitékají.
- Všechny strmé skalní stěny, které zásobují ledovec sněhem ve formě lavin, ale sníh se na nich neudrží dlouhodobě, nejsou součástí ledovce.
- Stagnující ledovcová hmota, která je stále v kontaktu s ledovcem, je považována za jeho součást.
- Všechny části pokryte horninovou sutí jsou součástí ledovce a musí být zahrnuty.
- Sněhová pole, jejichž velikost se mění rok od roku, by měla být měřena na konci sezóny tání, aby se vyloučila plocha sezónního sněhu.

Identifikaci a klasifikaci ledovců ze satelitních snímků i přes nezpochybnitelně velký pokrok neustále provází mnoho nepřesností a komplikací. Problém nastává u stíněných míst, ledovců pokrytých horninovou sutí či u sezónního nebo nového sněhu. Ledovce nebo jejich části pokryté horninovou sutí mají mnohdy stejnou odrazivost jako přilehlé morény, nebo okolní horninový materiál. Pro identifikaci takových partií se jako nejvhodnější stále jeví lidské oko a manuální vytyčení hranic s pomocí topografických dat, i přestože zde hrozí zatížení snímků chybou vzniklou subjektivním hodnocením autora, velmi často je využíván Google Earth (Kargel, 2005). Extrémně složité topografické podmínky, které jsou typické prakticky pro všechny vysokohorské oblasti, způsobují, že se na snímcích téměř vždy vyskytují stíněná místa, která skryjí pravou hranici ledovce. U sezónního nebo čerstvého sněhu vždy záleží na nedávných srážkových podmínkách před pořízením snímku v dané lokalitě. Nicméně obecně platí, že pokud to lze, je nejlepší pracovat se snímky z konce sezóny

tání, kdy je dosaženo maximální ablace a minimálního výskytu sezónního sněhu (nejlépe srpen – září).

3.7 Erozní činnost ledovců

Dle polohy izotermy 0°C se ledovce dělí na ledovec s chladnou bází a s teplou bází. U ledovce s chladnou bází se izoterma 0°C nachází na dně ledovce, ten tedy spočívá na trvale zmrzlém podloží, po kterém se nemůže pohybovat, neboť tření na této hranici je větší než tření na diskontinuitách uvnitř ledovce. Ke smyku tedy dochází právě na těchto diskontinuitách uvnitř ledovce. Ledovec s teplou bází má izotermu 0°C uvnitř ledovce, podloží není tedy zmrzlé, ledovec se může pohybovat po hranici led – horninové podloží, které je tak intenzivně glaciálně modelováno (Horník, 1986).

Výmolná činnost ledovců se nazývá glaciální eroze a je typická právě pro ledovce s teplou bází, kde není podloží ledovce zmrzlé. Účinky této ledovcové činnosti, jsou dnes nejlépe pozorovatelné ve vysokohorských oblastech, které byly v pleistocénu zaledněny a díky klimatickým změnám odtud ledovce postupně ustoupily. Následně je možno výsledky glaciální eroze studovat na vzniklých geomorfologických tvarech. Studováním rozsahu a intenzity ledovcové eroze a datováním jednotlivých útvarů lze následně vytvořit poměrně dobrou představu o tom, jak rozsáhlé zalednění v dané oblasti bylo (Anderson, 2004).

3.8 Morény

Ledovcovou činností vzniká velké množství různých geomorfologických útvarů, mezi ty nejvýraznější, nejmohutnější a pro studování dynamiky ledovců nejdůležitější patří nepochybně morény.

Veškerý horninový materiál, který ledovec transportuje a uloží, se označuje jako ledovcový nános, tedy till. Jeho výrazným znakem je netříděnost, nevrstevnatost, a malé opracování jednotlivých úlomků (Anderson, 2004). Formám ledovcových nánosů, které mají charakter jednotné pokrývky nebo valů, se říká morény. Zároveň se jako moréna označuje veškerý horninový materiál na povrchu, v nitru a na spodu ledovce a spolu s ním se tak pohybuje. Morény se dělí na pohyblivé, tedy živé a uložené – mrtvé.

3.9 Typy morén

3.9.1 Boční moréna

Ostrohranná suť uvolněná extraglaciálním zvětráváním a napadaná nebo dopravená lavinami na povrch ledovcových splazů, která jako val provází okraje ledovce a spolu s ním se pohybuje, se nazývá moréna boční (postranní či okrajová). Díky neustálému přibývání hmoty jsou směrem k čelu ledovcového splazu stále mohutnější. Velikost bočních morén se může pohybovat od několika desítek centimetrů a jednotek metrů až po stovky metrů. Například kanadský ledovec Athabasca vytvořil boční morénu vysokou 124 metrů (Fishpool, 1996). V pohoří Cordillera Blanca lze pozorovat například u ledovce Jatunraju boční morénu o výšce 70 metrů na vnější straně (Iturrizaga, 2013).

3.9.2 Čelní moréna

Dole se boční morény připojují ze stran k moréně čelní. Čelní (koncová) moréna je složená z již částečně opracovaných různě velkých balvanů uložených v hlinitopísčité drti. Tato moréna vznikla uložením veškerého materiálu pohyblivých povrchových vnitřních a spodních morén, který byl zanesen až ke konci ledovcového splazu. Výrazná čelní moréna vznikne ovšem pouze tehdy, jestliže ledovec stagnoval delší dobu na jednom místě (stacionární ledovec). Výška čelních morén se pohybuje od několika málo metrů až po morény vysoké i přes 200 metrů. Například ledovec Khumbu v Nepálu má čelní morénu vysokou 250 metrů (Hambrey a kol., 2009). Jezero Laguna Safuna Baja v pohoří Cordillera Blanca je hrazeno čelní morénou o výšce 60 metrů, která s největší pravděpodobností pochází z Malé doby ledové (Hubbard a kol., 2005). Výrazné jsou především morény u ledovců, které zasahovaly až na okraj pohoří. V obdobích, kdy se ustupující ledovec na některém místě opět po určité době zastaví, se může morénový materiál opět nahromadit u čela ledovce a vytvořit tak ústupovou morénu, kterých pak lze nalézt i několik za sebou (Chábera a kol., 1982).

3.9.3 Střední moréna

Pokud dojde ke spojení několika ledovcových splazů, spojí se i jejich boční morény na vnitřní straně a vzniká tak na povrchu ledovce nepravá střední moréna. Pravá střední moréna vzniká z materiálu pocházejícího ze skalního podkladu, který jako nezaledněný ostrůvek vystupuje nad ledovcový povrch. Dokonce dvě výrazné střední morény lze pozorovat například u kanadského ledovce Kaskawulsh. Střední morény sledují ohyby údolí,

směrem k podhůří se rozšiřují a na dolním konci někdy zcela pokrývají ledovcový jazyk a takovýto úkaz se nazývá moréna svrchní. Ke vzniku svrchní morény může přispět i silná ablace, kdy vystupuje morénový materiál z nitra ledovce na povrch (Anderson, 2004).

3.9.4 Vnitřní moréna

Materiál, který ve vyšších partiích ledovce spadá na jeho povrch a do jeho nitra a je tedy ledovcem pohlcen, se nazývá moréna vnitřní. Spodní moréna je tvořena z malé části materiálem, který se dostal z povrchu ledovce až na jeho dno, především však materiálem, který se uvolní tříštivou erozí a exarací ze skalního podkladu ledovce (Chábera a kol., 1982).

Podle výšky a mohutnosti morén lze usuzovat na polohu bývalého ledovcového splazu, jeho mocnost, šířku atd.

4 Malá doba ledová

4.1 Obecná charakteristika

Pojem Malá doba ledová poprvé použil ve 30. letech 20. století François Matthes, aby jím popsal období nárůstu ledovců v minulých stoletích, které bylo následováno teplejší fází Holocénu (Matthes, 1939; Grove, 1988). Toto období je chápáno jako jedna z nejvýznamnějších klimatických fluktuací v Holocénu. Pojem Malá doba ledová dnes tedy označuje nedávné období v minulosti, kdy došlo k výraznému ochlazení oproti dlouhodobému průměru a k poměrně významné expanzi horských ledovců. Konvenčně se udává období od 16. století do poloviny 19. století, neboť během této doby bylo evropské klima silně ovlivněno. Tomuto období předcházelo takzvané středověké klimatické optimum, perioda, kdy bylo tepleji asi o 0,1 až 0,2 °C, než byl průměr mezi lety 1961-1990. Malá doba ledová pak končí prudkým vzrůstem teplot na konci 19. století a především pak v průběhu 20. století, zaviněných hlavně zvýšenou činností člověka, tedy intenzivním spalováním fosilních paliv a vysokou produkcí skleníkových plynů (Mann, 2002).

Zpočátku nebyl tento jev vnímán jako globální, ale s přibývajícemi studiemi z různých částí světa včetně tropických pohoří potvrzujících přibližně 600 let trvající chladnější období se toto vnímání změnilo a dnes je Malá doba ledová chápána jako událost, která sice nejde popsat jako souvislý globální jev, ale její projevy lze najít téměř ve všech světových regionech, byť různého rozsahu a s různým časovým zařazením (Clapperton, 1983; Grove, 1988). A přestože tedy existují důkazy o Malé době ledové i mimo Evropu, jako jsou nižší dlouhodobé teploty, expanze horského zalednění a další výrazné změny klimatických podmínek, načasování a projevy ochlazení se velice různí region od regionu, a proto bylo označení Malé doby ledové jako globálně synchronní chladné periody mnoha autory v 90. letech 20. století zamítnuto (Bradley a kol., 1993; Mann a kol., 1999). Pokud je tedy Malá doba ledová brána jako událost ve velkém měřítku, musí být definována jako malé ochlazení severní polokoule přibližně o 0,6 °C během 16-19. století.

4.2 Vliv Malé doby ledové na společnost

Dlouhodobé sledování ústupu horských ledovců, sledování meteorologických a klimatických podmínek a především pak i několik staletí dlouhé řady měření teploty (Bradley a kol., 1993) podávají nezvratný důkaz o Malé době ledové. Další důkazy lze nalézt i v historických kresbách a malbách především z horského prostředí. Obzvláště při porovnání těchto kreseb s fotografiemi ze současnosti zachycujícími stejný ledovec vynikne výrazný ústup ledovců od konce Malé doby ledové. Malá doba ledová do značné míry ovlivnila lidskou populaci a její vývoj, především pak v Evropě, což dokazuje další řada důkazů z oblasti demografie, sociologie, ale i literatury. Učebnicovým příkladem je údolí Chamonix pod masivem Mont Blanc ve Francii, kde byly ledovcem zničeny celé farmy a vesnice. A ještě známějším důsledkem tuhých zim, je tradiční představa bílých Vánoc proslavená anglickým spisovatelem Charlesem Dickensem (Le Roy, 1971). Malá doba ledová se mnohdy projevovala více zvýšenou proměnlivostí chodu teplot a srážek v kratších obdobích, často i rok od roku, než aby vyvolala zásadní změny klimatu od dlouhodobého průměru (Mann, 2002).

4.3 Zdroje dat a metody datování

Jako nepřímý důkaz o růstu (méně přesně pak o ústupu) horského zalednění, se užívá informace o stáří, pozici a rozměru morén. Tato informace se v současnosti nejčastěji získává metodami lichenometrie a dendrochronologie, nebo jejich kombinací. Jedná se o nepřímé metody měření, které jsou však dnes již poměrně spolehlivé a přesné a hlavně jsou cenově a časově nenáročné (viz kap. 5). Tyto důkazy potvrzují expanzi horského zalednění i mimo evropský region, například na Aljašce (Solomina a kol., 2003), Kamčatce (Solomina a kol., 1995), ale také na jižní polokouli v Bolívii (Rabatel a kol., 2005), v Peru (Rodbell, 1992; Solomina a kol., 2007), v Chile (Winchester a kol., 2000) a v Patagonii (Grove, 1988). Nelze však hovořit o zcela synchronním ochlazení a chladnější období se neshodují, ale liší se i v řádu dekád. Tyto metody jsou navíc značně ovlivněny místní topografií a místním klimatem, je tedy velmi těžké odlišit místní vlivy od vlivů globálních a vždy je nutné danou metodu zkalibrovat pro konkrétní lokalitu (Armstrong, 2004). V neposlední řadě je nutné dodat, že horské ledovce reagují na změnu klimatu velmi různě, jedním z hlavních vlivů, jak rychle zareagují, jsou jejich rozměry. Zatímco relativně velké ledovce například v Himalájích

nebo i Alpách reagují poměrně pomalu v řádech desítek let až století, drobné ledovce v tropickém pásmu reagují na každou změnu regionálního klimatu velice rychle v řádu několika málo let (Kaser a kol., 1990). Proto se používají další nepřímá měření, aby se informace o klimatu minulých století zpřesnily. Mezi tato měření patří například vrty ledovcových jader, uložení a hloubka takzvaných varv (roční vrstva sedimentů v ledovcovém jezeře), využívá se i radiokarbonová metoda datování (Mercer a kol., 1977; Röthlisberger, 1987), nebo méně tradiční metody jako je například tephrochronologie (Solomina a kol., 2003).

4.4 Malá doba ledová v Evropě

Podle historických záznamů a dendrochronologických měření bylo v severozápadní Evropě nejchladnější období mezi lety 1830 – 1860 a nejdelší výrazně chladnější období bylo 1550 – 1750, přičemž z tohoto období bylo nejchladněji mezi roky 1600 – 1640. Naopak teplé periody se v tomto regionu vyskytly ve 20. letech 16. století a na počátku 19. století (Briffa a kol., 1990). Podobně v Rusku bylo 17. století velmi chladné, zde však bylo období mezi roky 1860 – 1920 ještě chladnější (Borisenkov, 1992). Ve Švýcarsku se první obzvláště studené zimy začaly objevovat po roce 1550, první chladné jaro je zaznamenáno v roce 1568, v roce 1573 pak bylo první neobvykle studené léto (Pfister, 1995). Nejnižší teploty jsou pak ve Švýcarsku zaznamenány v období let 1810 – 1880 a následně počátek 20. století. Evropské záznamy lze tedy shrnout tak, že nejchladněji bylo během 17. století a v druhé polovině 19. století a na počátku 20. století (Bradley a kol., 1993).

Expanze horských ledovců v Evropě je tedy důkazem poklesu teploty mezi 17. - 19. stoletím přibližně o 0,4 °C oproti současnému dlouhodobému průměru a v 17. století dokonce o více než 0,6 °C. Tento závěr pak potvrzují i rekonstrukce historických letních teplot v Evropě z letokruhů. Ve výsledku byla severní polokoule mezi lety 1400 - 1900 o 0,3 °C chladnější než předchozí období mezi lety 1000 - 1400 a dokonce o 0,8 °C chladnější než konec 20. století (Jones a kol., 1998). Malá doba ledová tedy dle všeho nejvíce zasáhla Severoatlantický region. Nejchladnější se tedy jeví konec 15. století, 17. století a první polovina 19. století jako tři chladné epizody (Mann, 2002).

4.5 Malá doba ledová ve světě

Mimo severoatlantický region jsou stopy po Malé době ledové o dost méně výrazné. Pro evropský region typické tři chladné epizody již například pro Jižní Ameriku nejsou tak jednoznačné a ve východní Číně důkazy o Malé době ledové prakticky chybí. To vše lze vidět na obrázku 2, kde jsou zobrazeny odhadované relativní změny teploty pro jednotlivá místa na světě. Na rozdíl od pravých dob ledových v pleistocénu, kdy docházelo k dramatickému nárůstu všech hlavních pevninských ledovců a globálnímu snížení teploty pravděpodobně o 2 - 3 °C vůči dnešnímu dlouhodobému průměru, u Malé doby ledové neexistují žádné důkazy o spojitém globálním ochlazení synchronním se stavem v Evropě. Co ale důkazy naznačují, je, že se obecně ve světě v průběhu 13. – 19. století vyskytovaly chladnější období, ovšem region od regionu v různém čase a mnohdy přerušovaná periodou teplejší. Pro příklad v Evropě bylo nejchladnější 17. století, nicméně v Severní Americe to bylo až 19. století, kdy v Evropě dochází už pouze k menšímu ochlazení oproti Severní Americe a v druhé polovině 19. století se již spíše mluví o postupném oteplování (Mann, 2002).

Dendrochronologické výzkumy ze Severní Ameriky lze shrnout tak, že nejchladnější období se vyskytlo na počátku 17. století a 19. století. Nejdelší nepřerušovaná chladná perioda byla mezi roky 1860 – 1930. Kratší chladné periody lze pozorovat mezi lety 1750 – 1765 a 1830 – 1850 (Bradley a kol., 1993).

Výzkumy z východní Číny a Korey naznačují postupné ochlazování regionálního klimatu přibližně od roku 1500 s nejchladnějším obdobím v polovině 17. století kolem roku 1650. Poté došlo k oteplení, které bylo přerušeno dalším chladnějším obdobím na počátku 19. století. Nicméně lze obecně říci, že ochlazení ve východní Číně bylo menšího rázu, než to v Evropě (Kim, 1984).

Na jižní polokouli jsou záznamy o Malé době ledové spíše vzácné a výzkumy se zde objevují až v posledních letech. Dendrochronologické záznamy z Tasmánie a Nového Zélandu nenaznačují za posledních 500 let žádné období výrazně chladnější než 20. století (Bradley a kol., 1993). Snad jen v Tasmánii by se dalo diskutovat o období mezi lety 1890 – 1920 jako o něco chladnějším než je dlouhodobý průměr.

4.6 Malá doba ledová v Jižní Americe

Kolísání horských ledovců během Malé doby ledové na jižní polokouli se ve velmi hrubém měřítku shoduje s chováním ledovců na severní polokouli, přesnější výzkumy prováděné v posledních letech však potvrzují všeobecně přijímaný názor, že konkrétní období nárůstu ledovců se v jednotlivých světových regionech liší (Rabatel a kol., 2005). Co se týče Jižní Ameriky, lze s odhlédnutím od malých odchylek v řádu několika let považovat tento region v rámci Malé doby ledové za homogenní. Bylo zjištěno, že patagonské ledovce dosáhli svého maxima během Malé doby ledové mezi lety 1600 – 1700, což přibližně odpovídá i maximu v pohoří Cordillera Blanca. Nárůsty ledovců v 19. století se také časově shodují od Aljašky až po Patagonii (Luckman a kol., 2001).

Zatímco pro Alpy existuje bohatá sbírka historických dokumentů, pro Andy a Jižní Ameriku jsou záznamy velmi vzácné. Existuje jen pár záznamů od cestovatelů a vědců z cest do Peru a Bolívie (Broggi, 1943), nebo informací od horníků z hornických osad (Sievers, 1914). Tito autoři zaznamenali výrazný nárůst ledovců během 16. – 19. století a následný ústup započatý v Peru v roce 1860 a v Ekvádoru v roce 1880 (Broggi, 1943). Podle analýzy stabilního izotopu ($\delta^{18}\text{O}$) a prachových částic z ledovcového jádra z ledovce Quelccaya, Peru ($13^{\circ} 56' 0''$ j. š., $70^{\circ} 50' 0''$ z. d.) bylo odhadnuto trvání Malé doby ledové v této oblasti mezi roky 1500 – 1900. Obecně je koncentrace tohoto izotopu řízena spíše teplotou, konkrétněji teplotou srážek, než intenzitou srážek, poslední výzkumy ale ukazují, že v tropech převažuje vliv srážek (Thompson a kol., 1986).

Jednou z metod datování je výzkum jezerních sedimentů, jeden takový nedávný výzkum jezerních sedimentů naznačuje období nárůstu ledovců ve venezuelských Andách mezi roky 1250 – 1810, nicméně tato metoda nedovoluje přesnější časové zařazení a specifikaci jednotlivých období nárůstu (Polissar a kol., 2006). Další metodou, která se dnes již na datování Malé doby ledové nepoužívá tak často, neboť je pro období nejbližších 500 let poměrně neefektivní je radiokarbonová metoda datování (Armstrong, 2004). Jeden výzkum používající radiokarbonovou metodu datování zjistil dobu pohřbení půdy ledovcem Ocshapalca v pohoří Cordillera Blanca do intervalu 1300 – 1660. Nárůst ledovce musel přijít tedy někdy po tomto datu (Röthlisberger, 1987). Druhým příkladem využití této metody je studie z Peru, ve které byly pomocí ní zjištěny dvě období během Malé doby ledové, kdy byly

vytvořeny morény, a sice první fáze před 600 - 300 lety a fáze druhá před 200 - 100 lety (Mercer a kol., 1977).

V první polovině 19. století byl u ledovců na severní polokouli pozorován opětovný silný nárůst ledovcové hmoty (Luckman, 2000; Nesje a kol., 2003). Takto rozsáhlý a významný nárůst ovšem v tropických Andách nebyl pozorován u žádného ledovce. Tato neshoda v dynamice ledovců musí tedy souviset se specifickými změnami regionálních podnebí. Teplota sice pravděpodobně v tropických Andách poklesla během první poloviny 19. století, ale srážky byly také velmi malé a nedostačující proto, aby došlo k významnému nárůstu ledovců (Rabatel a kol., 2005). Vše nasvědčuje tomu, že pro nárůst tropických ledovců je klíčový vysoký úhrn srážek spíše, než pokles teploty. V jižním Peru byly sněhové srážky během první fáze Malé doby ledové poměrně vysoké asi do roku 1720, díky čemuž zde došlo k poměrně výraznému nárůstu ledovců (Solomina a kol., 2007), zatímco mezi lety 1720 – 1880 bylo srážek málo a lze hovořit o suchém období (Thompson a kol., 1986). To je ve shodě s dynamikou zdejších ledovců, jejichž rozsah se během této suché fáze příliš nezvětšil. Podle nového výzkumu bylo maximum Malé doby ledové v tomto regionu zapříčiněno úhrnem srážek vyšším o 20 – 30 % oproti současným podmínkám a teplotě nižší o 1,1 – 1,2 °C než je dnes (Rabatel a kol., 2008).

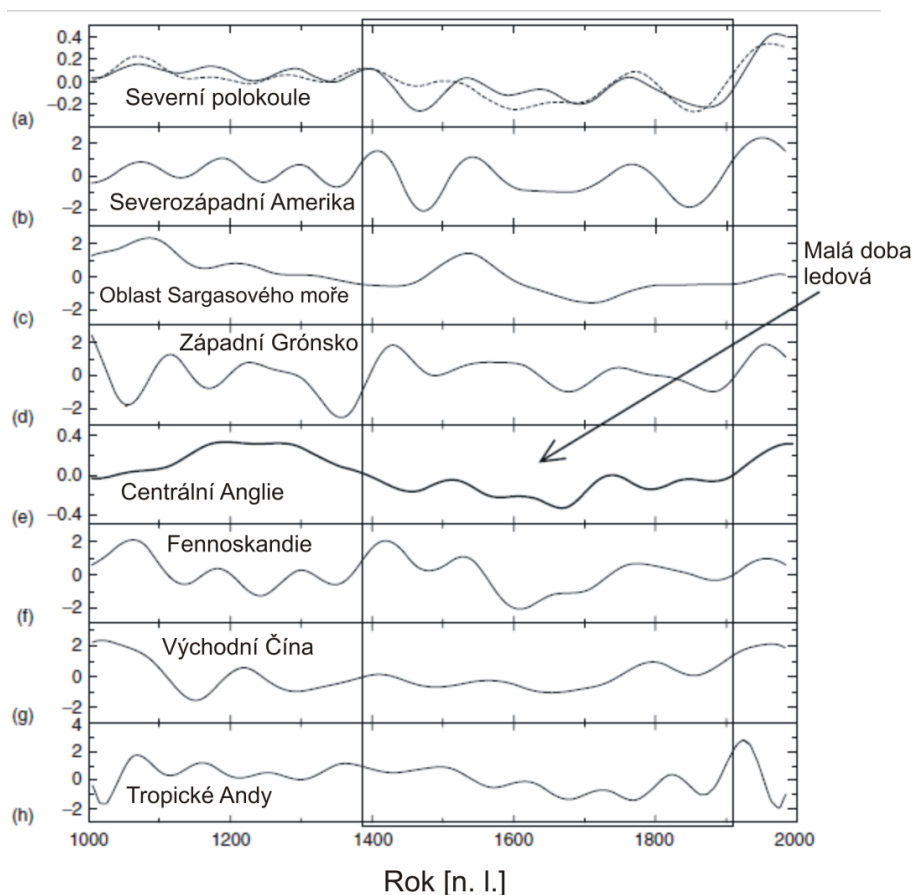
4.7 Malá doba ledová v pohoří Cordillera Blanca

V tropických pohořích může poloha a stáří morén sloužit jako spolehlivý indikátor klimatických změn, neboť reakce tropických ledovců na změnu klimatu je velmi krátká v řádu několika málo let (Rabatel a kol., 2005). V nedávné době vědci pomocí lichenometrických studií v Peru v pohoří Cordillera Blanca odhadli stáří morén a tedy i období nárůstu ledovců. Vytyčili období maxima mezi lety 1590 - 1720 a období menších nárůstů mezi lety 1780 – 1880 (Solomina a kol., 2007; Rodbell, 1992).

Následně došlo ke zpřesnění časového průběhu Malé doby ledové v tomto pohoří pomocí nové lichenometrické metody (viz kap. 5.6.7). Výsledkem je objevení a potvrzení rané fáze Malé doby ledové okolo roku 1330 +/- 29 (Jomelli a kol., 2007). Později ovšem následovala fáze, kdy došlo k mnohem rozsáhlejšímu nárůstu ledovců, který je v tomto regionu považován za maximum Malé doby ledové, neboť morény z této periody lze najít u

všech místních ledovců, maxima zde ledovce dosáhli kolem roku 1630 +/- 27. Následně docházelo k postupnému ústupu ledovců, který byl několikrát narušen dlouhodobějším zastavením nebo drobnějšími nárůsty ledovcové hmoty, které už však nikdy nedosáhly maxima z počátku 17. století. Tyto nárůsty se objevovaly během 18. a 19. století a nejméně tři různá období tohoto nárůstu lze definovat, vždy však pro jiné ledovce. Povedlo se datovat nárůst v roce 1670 +/- 24, 1730 +/- 21 a 1760 +/- 19 (Jomelli a kol., 2007).

Ledovce v pohoří Cordillera Blanca jsou obecně na výrazném ústupu od Malé doby ledové. Ve 20. letech 20. století sice došlo k dočasnému nárůstu ledovcové hmoty, ten byl však velmi rychle potlačen během 30. a 40. let. Následujících dvacet let zůstal rozsah zalednění přibližně stejný (Kaser a kol., 1990). V 70. letech došlo následně k poslednímu mírnému nárůstu ledovců (Ames, 1998), který byl však následován výrazným a neustále zrychlujícím ústupem všech ledovců v tomto pohoří od 80. let minulého století, který pokračuje dodnes.



Obrázek 2. Odhad relativní změny teploty pro různé světové regiony v minulém tisíciletí (podle Mann, 2002)

Křivky jsou vyhlazeny, aby vynikly dlouhodobé změny. (a) – roční teplotní průměr pro celou severní polokouli (b) – letokruh ze západu Severní Ameriky, (c) – záznam sedimentů v Sargasovém moři, (d) ledovcové jádro ze západního Grónska, (e) – kombinace naměřených historických teplot a nepřímých měření ze střední Anglie, (f) – letokruh z Fennoskandie, (g) – fenologický důkaz z Jižní Číny, (h) – ledovcové jádro z tropických And. Teplota je ve stupních Celsia.

4.8 Možné příčiny Malé doby ledové

Otázka je, co zapříčinilo Malou dobu ledovou. Jedná se o klimatickou periodu, která ještě nebyla prakticky ovlivněna lidskou činností, především se myslí spalování fosilních paliv globálně započaté s příchodem průmyslové revoluce (Mann, 2002). Jedním z možných vysvětlení může být vnitřní dočasný výkyv v globálním klimatickém systému. Svou roli mohou hrát i velké sopečné erupce a následně zvýšený výskyt sopečného prachu v atmosféře, jak potvrzuje příklad z roku 1815 a erupce sopky Tambora v Indonésii. Sopečných erupcí bylo opravdu během 19. století relativně více než v průběhu 20. století (Bradley a kol., 1993). Změny dlouhodobějšího rázu jsou však přisuzovány především Maunderovu minimu, což je období sluneční aktivity mezi lety 1638 - 1715, kdy se na Slunci neobjevovaly téměř žádné sluneční skvrny. Vlivem toho bylo podnebí na Zemi chladnější hlavně v 17. století a v 18. století dochází již k oteplení (Rozeňnal, 2015). Nezpochybnitelný vliv přinejmenším v regionálním měřítku měly i klimatické jevy jako El Niño a Jižní oscilace nebo Severoatlantická oscilace. V neposlední řadě měla vliv i změna cirkulace vod v Severním Atlantiku. Podíl jednotlivých faktorů na vzniku Malé doby ledové je stále předmětem výzkumu (Mann, 2002).

5 Lichenometrie

5.1 Lichenometrie a lišejníky

5.1.1 Obecné informace

Lichenometrie je jedna z nejvíce rozšířených technik, jak získat přibližná data o stáří tvarů reliéfu, jako jsou například morény nebo sesuvy půdy. Jako mnoho dalších chronologických nástrojů i lichenometrie umožňuje s určitou přesností odhadovat uplynulou dobu od dané události, od odhalení skalního podkladu. Užitečnost této metody v datování povrchu je přibližně 500 let do minulosti, což je perioda, ve které je radiokarbonová metoda datování poměrně neefektivní, a činí tak lichenometrii velmi výhodnou pro mnoho různých vědeckých oborů. Další velkou výhodou je, že poskytuje data o stáří skalního podkladu velmi rychlou a levnou cestou, a to s poměrně dobrou přesností (Armstrong, 2004). Lichenometrie byla vyvinuta v 50. letech minulého století botanikem Rolandem Beschelem za účelem datování alpských ledovců (Beschel, 1950).

5.1.2 Lišejníky

Lišejníky jsou jedny z nejběžnějších organismů na Zemi a lze je nalézt v různých prostředích včetně povrchů kamenů, stromů a lidských staveb. Dnes je známo přibližně 13 500 – 17 000 druhů lišejníků (Nash, 1996). Lišejník je symbiotické společenství houby a řasy či sinice, které tak tvoří jeden makroorganismus. Vzájemné vztahy mohou přecházet od oboustranně výhodného mutualismu až k negativnímu parazitismu a toto soužití je natolik specifické, že se označuje jako lichenismus. Houba a řasa se vzájemně zásobují organickými, anorganickými látkami a vodou a společně si tvoří vhodné prostředí pro růst a výměnu plynů.

Podle vzhledu stélky existuje několik druhů lišejníku, pro lichenometrii jsou ovšem nejvýznamnější lišejníky s korovitou stélkou, které pevně srůstají s podkladem a často obrůstají celá skaliska, příkladem takového lišejníku je Mapovník zeměpisný (*Rhizocarpon geographicum*). Tyto lišejníky rostou radiálně a rychlost jejich růstu je velmi pomalá. Radiální růst může být mezi 2 a 5 mm za rok, ale velmi často to může být i méně než 0,5 mm za rok. V polárních oblastech existují i takové druhy, které rostou tak pomalu, že jejich odhadované stáří je okolo 5 000 let a činí je tak jedněmi z nejstarších organismů na světě. A právě

dlouhověkost a velmi pomalý růst z nich dělají velmi vhodný nástroj pro lichenometrii a datování (Innes, 1985).

5.1.3 Mapovník zeměpisný

Většina lichenometrických studií pracuje se specifickým žluto-zeleným druhem Mapovníkem zeměpisným, který se hojně vyskytuje právě v alpinském a arktickém prostředí, a díky své barvě je velmi snadno rozeznatelný v krajině. V tomto prostředí již často nerostou žádné stromy a není zde tedy možné provádět dendrochronologické datování, právě proto je v těchto místech lichenometrie a tento druh tak cenný (Jomelli a kol., 2007). Lišejník může růst i několik tisíc let a roste rychlostí pouze 0,2 – 2 mm/rok. Mapovník zeměpisný (*Rhizocarpon geographicum*) patří do třídy vřeckovýtrusných, každý lišejník je plochá korovitá stélka žlutozelené barvy, která je pevně spojená s podkladem, rozrůstá se radiálně a je ohraničena černým pásem výtrusů (viz obr. 3). Tento druh je velmi citlivý na znečištěné ovzduší (Armstrong a kol., 1987).



Obrázek 3. Mapovník zeměpisný (*Rhizocarpon geographicum*) autor: Stanislav Krejčík

5.2 Metody měření

Lichenometrie je postavena na předpokladu, že je známé časové zpoždění způsobené kolonizací skalního podkladu a růst lišejníku může být změřen, pak je možné zjistit minimální

datum pomocí měření průměru (nebo jiného parametru souvisejícího s velikostí) největšího lišejníku v dané lokalitě. Metoda se nejvíce využívá nad a za hranicí lesa a obzvláště v alpinském a arktickém prostředí, kde lišejníky rostou velmi pomalu. V takových případech je možné datovat i několik tisíc let do minulosti, v naprosté většině případů je však metoda spolehlivá přibližně 500 let zpátky (Armstrong, 2004).

5.2.1 Měření velikosti stélky

V různých lichenometrických studiích, bylo navrženo několik různých způsobů, jak nejhodněji měřit velikost stélky lišejníku. Metoda největší vepsané kružnice, která se vejde do jednoho lišejníku, byla navržena (Locke a kol., 1979) a následně využita v mnoha studiích a je ekvivalentem k použití nejmenšího průměru lišejníku. Naproti tomu mnoho jiných navrhovalo metodu největšího průměru jako nejpřesnější, velkou nevýhodou této metody však je to, že jednotlivé stélky lišejníku srůstají dohromady a mohou být následně změřeny jako jedna stélka (Armstrong, 1984). Mezi další zkoušené způsoby patří aritmetický průměr nejdelšího a nejkratšího průměru stélky.

5.2.2 Výběr stélky

Druhou a snad ještě významnější otázkou je, na kterých stélkách průměr měřit. Prvním přístupem bylo změření průměru jedné největší stélky v dané lokalitě a ta je považována za reprezentativní co se týče věku (Beschel, 1950), tento přístup byl dále zpřesňován (Webber a kol., 1973), až bylo navrženo, že se vytvoří aritmetický průměr několika největších stélek z dané lokality (Matthews, 1974). Někteří využili četnost výskytu jednotlivých velikostí stélek jako indikátor stáří podkladu, ale zde nastává problém, že distribuce četností výskytu může být interpretována s ohledem na stáří podkladu různými způsoby a může dojít k různým výsledkům (Innes, 1985). V posledních letech se ukazuje, že metody, které sbírají pouze malý vzorek dat (1 největší stélka na moréně) jsou méně přesné, než novější metody, které sbírají a statisticky zpracovávají velké množství vzorků (desítky až stovky měření na jednu morénu). Využívání různých metod během padesátileté historie lichenometrie vedlo k značné nejednotnosti v metodice, která stále není dořešena a ani dnes není jisté, která metoda přináší nejpřesnější výsledky. Tato neshoda je jedním z největších nedostatků lichenometrie a je výzvou do budoucna (Jomelli a kol., 2007).

5.2.3 Metoda GEV

V posledních letech se ovšem většina vědců začíná přiklánět ke zcela nové metodě založené na statistické Teorii extrémních hodnot (Extreme value theory). Metoda se jmenuje Generalized extreme value method – GEV, využívá především extrémní hodnoty a Bayesovskou statistiku. Aby metoda správně fungovala, je třeba změřit největší stélku na každém balvanu ve vybrané lokalitě. Model následně počítá nejen průměry velikostí lišejníků, ale vytváří celou distribuci měření stélek, aby byly co nejlépe spočítány a popsány průměry lišejníků (Cooley a kol., 2006). Následně se pomocí iterací hledají co nejvhodnější parametry křivky růstu pro daná měření. Specifické je pro tuto metodu také to, že se pracuje s měřeními ze známých a neznámých povrchů společně dohromady v jednom souboru (Jomelli a kol., 2007). Zdá se, že tato metoda nabízí nejspolehlivější odhady stáří s nejmenšími nejistotami, pokud se to s přibývajícími studii potvrdí, tak tato metoda převládne jako zcela nejvhodnější pro lichenometrii.

5.3 Křivka růstu

5.3.1 Přímá a nepřímá metoda

Křivka růstu lišejníku může být stanovena dvěma způsoby. Buď přímo měřením rychlosti radiálního růstu stélky během určité časové periody, nebo nepřímo měřením průměru stélky lišejníku na podkladu se známým datem stáří. V praxi se jeví jako mnohem užitečnější metoda nepřímá, neboť v sobě zahrnuje vliv klimatických změn na růst lišejníku v dlouhém časovém období.

Existují rozmanité zdroje, z kterých lze získat informaci o stáří podkladu a stanovit tak křivku růstu včetně náhrobních kamenů, důlních výsypek, opuštěných farem a domů, kamenných mohyl a zídek. K tomu lze přidat i přírodní útvary, u kterých se podařilo určit přesné stáří z historických událostí, radiokarbonovou metodou datování nebo s využitím dendrochronologie.

5.3.2 Tvar křivky

První studie popisovaly křivku radiálního růstu stélky jako logaritmickou, později byla křivka rozdělena na první část, která je logaritmická, pak se růst zpomalí a ustálí a nastává fáze lineární, následovaná ještě fází nazvanou postlineární (Armstrong, 1974). Někteří autoři považují vzorec růstu za logaritmický po celý život lišejníku (Matthews, 1974). Jak se ale

ukázalo z přímého měření a bylo následně potvrzeno mnoha studii využívajícími nepřímou metodu, křivka radiálního růstu stélky je nelineární. Nejprve se rychlost růstu zvyšuje, až v určité fázi dosáhne svého maxima (u přímého měření pro druh *Rhizocarpon geographicum* se tak děje u dosažení průměru stélky mezi 2,5 – 4,5 cm) a následně růst zpomaluje (příklad viz obr. 4). Děje se tak s nejvyšší pravděpodobností kvůli senescenci stélky (Armstrong, 1983).



Obrázek 4. Křivka růstu pro druh *Rhizocarpon geographicum*, jihovýchodní Island (podle Armstrong, 2004)

Příklad křivky růstu lišejníku Rhizocarpon geographicum z jihovýchodního Islandu vytvořená pomocí lichenometrie. Nelineární tvar křivky je typickou vlastností mnoha křivek růstu lišejníku z různých částí světa.

5.3.3 Faktory ovlivňující rychlost růstu

Zcela zásadní pro stanovení přesné rychlosti růstu lišejníku a vytvoření správné křivky růstu je zakomponování klimatických podmínek v dané lokalitě. Jak dokazují například studie z Aljašky, lišejník roste rychleji čím je jeho prostředí teplejší a vlhčí. Rychlost růstu tedy klesá se zvyšující se kontinentalitou prostředí a v přímořských oblastech naopak roste. Velmi rychle například Mapovník zeměpisný roste v Aljašském zálivu s vysokými srážkami a velmi pomalý růst vykazuje tento druh v Brooksově pohoří daleko na severu. Velmi podobně klesá rychlost růstu lišejníku i s rostoucí nadmořskou výškou (Solomina a kol., 2003).

5.3.4 Nedostatky lichenometrie

Stále však v lichenometrických studiích existuje velké množství nepřesností vycházejících z neznalostí životního cyklu lišejníků, jako například přesnou dobu kolonizace podkladu, nebo vliv vnějších faktorů na rychlost růstu lišejníku. Navíc je dodnes diskutována otázka toho, zda je vhodné používat velikost průměru stélky jako index stáří lišejníku (Innes, 1985). Navzdory všem těmto nedořešeným problémům, funguje lichenometrie v kombinaci s dalšími metodami jako velice cenný nástroj v datování povrchů a tvarů reliéfu.

5.4 Využití Lichenometrie ve světě

5.4.1 Příklady využití

Lichenometrie je ve světě využívána k datování mnoha různých událostí, byla využita při odhadu stáří soch na Velikonočních ostrovech, starých kamenných zdech v Anglii, využívá se při datování říčních záplav, změn výšky mořské hladiny, nebo v případě sesuvů půdy (Innes, 1985). Zdaleka nejvíce je však lichenometrie využívána k datování ledovcových morén, které po sobě zanechává v krajině ustupující ledovec, a lichenometrické studie jsou tak důležitým příspěvkem do diskuze o klimatických změnách a globálním oteplování (Armstrong, 2004).

5.4.2 Využití Lichenometrie ve Washington State, USA

Příkladem takového využití může být studie provedená na morénách Mount Rainier ve Washington State, USA. Byly použity historické důkazy, budovy a další objekty v národním parku, aby byla vytvořena křivka růstu od roku 1857 do současnosti. Měřilo se na druhu *Rhizocarpon geographicum* a byla využita metoda největší samostatné stélky a jejího největšího průměru. Výsledkem bylo zpřesnění data stabilizace morény o 4 roky (Porter, 1981).

5.4.3 Využití Lichenometrie ve Švýcarsku

V západním Švýcarsku byla provedena lichenometrická studie na dvou malých ledovcích Ferpècle a Mont Miné, které vznikly rozpadnutím většího ledovce při ústupu z maxima od Malé doby ledové. Využily k tomu tři různé metody měření průměru stélky lišejníku a výsledky porovnávaly s historickými zdroji, jako jsou staré mapy, obrazy a fotografie (Masset, 2012).

5.4.4 Využití Lichenometrie na Aljašce a Kamčatce

Studie shrnující a spojující několik předešlých studií z oblasti Aljašky (Calkin a kol., 1980; Denton a kol., 1973; Wiles a kol., 1994) a Kamčatky (Savoskul, 1999; Solomina a kol., 1995) využila toho, že všechny tyto studie použily velmi podobné metody lichenometrie a jejich výsledky se dají tak porovnávat a slučovat do obsáhlejších závěrů. Chronologie zalednění v pozdním holocénu založené na lichenometrii pro severní Aljašku a Kamčatku si jsou až překvapivě podobné, tuto podobnost potvrzují i přesnější chronologie založené na dendrochronologii, to jednak podporuje naznačený vztah mezi těmito lokalitami, ale především to podporuje spolehlivost lichenometrie (Solomina a kol., 2003). Většinou byl opět využit Mapovník zeměpisný a byl měřen největší průměr největší stélky, nebo byl vytvořen průměr z 5 největších. Data z 94 aljašských ledovců dovolila definovat 3, možná až 4 nárůsty ledovců v minulém tisíciletí. Ten nejstarší proběhl okolo roku 1175, následovalo několik století ústupu a další nárůst přišel až v 16. a 17. století. Poslední nárůst ledovců vytvořil morény datované přibližně do roku 1875. Podobně tomu je i na Kamčatce kdy se největší nárůsty datují doprostřed 16. století, první poloviny 17. století a konce 19. století. Kamčatské ledovce od maxima Malé doby ledové ztratili přibližně 100 metrů na mocnosti a v průměru ustoupily o 600 metrů (Solomina a kol., 1995).

Zajímavostí je, že studie na Kamčatce využily k získání kontrolních bodů kromě standardně využívaných historických důkazů a dendrochronologie také mladé lávové proudy, u nichž je známo kdy vznikly, a tephrochronologii. Jde o chronologickou metodu, která datuje podle usazených vrstev tefry – sopečného popela vzniklých jednotlivými sopečnými erupcemi u kterých je známo, kdy proběhly. Takových je na vulkanicky aktivní Kamčatce mnoho a je tu tato metoda tedy hojně využívána (Solomina a kol., 2003). Jednou z velmi dobře zaznamenaných erupcí je erupce vulkánu Shiveluch z roku 1854.

Druhým originálním příspěvkem je pokus o sloučení křivek růstu dvou různých druhů lišejníku do jedné, neboť se zdá, že křivka růstu druhu *Rhizocarpon geographicum* je přesnější v mladším období, zatímco křivka pro druh *Rhizocarpon Alpicola* je přesnější, když je lišejník starší. Tímto spojením by se dalo dosáhnout ještě lepších výsledků, ale tento přístup ještě nebyl testován v praxi, je tedy nutné ho nejprve řádně vyzkoušet a zdokonalit, než bude moci být použit (Solomina a kol., 2003).

5.5 Využití Lichenometrie v Jižní Americe

5.5.1 Využití Lichenometrie v Chile

V jižním Chile se využívá kombinace dendrochronologie a lichenometrie k pozorování fluktuace ledovců v 19. a 20. století a následného ústupu ledovců z maxima Malé doby ledové, kterého ledovce v této lokalitě dosáhly mezi lety 1850 a 1880. Tyto metody společně předkládají další důkaz o ústupu těchto ledovců, který od 40. let minulého století navíc zrychluje (Harrison a kol., 2000). Lichenometrické studie tento trend zrychlujícího se ústupu ledovců potvrzují na většině míst světa.

Jiná studie z podobné lokality studující ústup ledovců Arenales a Colonia od Malé doby ledové využila taktéž kombinaci lichenometrie a dendrochronologie. Vzhledem k tomu, že v této lokalitě bylo provedeno jen velmi málo výzkumů datujících ledovcovou minulost, není zde mnoho lidských obydlí a nebylo zde zaznamenáno mnoho historických událostí, je velmi těžké rekonstruovat historii této krajiny. Navíc v této oblasti převládají velmi náročné klimatické podmínky včetně neustávajících větrů, sucha, nízkých teplot, což značně stěžuje přežití všech organismů. Pávě proto bylo využito obou metod, které se navzájem podpořily při stanovení křivek rychlosti růstu, času potřebného pro kolonizaci odkrytého podkladu atd. Dendrochronologická část byla vytvořena pomocí 124 měření provedených na pabuku. Bylo zjištěno, že prakticky nelze určit univerzální čas nutný pro kolonizaci, neboť ten se zde pohybuje od 5 let v závětrných místech až po 67 let na exponovaných místech (Villalba a kol., 1990), a je tedy nutné vždy určit tento čas pro každou lokalitu zvlášť. Pro tuto lokalitu byl stanoven čas kolonizace 26 let. Pro lichenometrickou část bylo provedeno 2800 měření lišejníku druhu *Placopsis perrugosa*. Vždy byly vybrány balvany s největším počtem zdravých, přibližně kulatých stélek, u kterých byl měřen největší průměr. Právě kvůli absenci historických budov a objektů se známým stářím, byla k vytvoření křivky růstu využita metoda histogramu velikosti jednotlivých stélek (Winchester, 1989). Byla stanovena rychlost růstu *Placopsis perrugosa* na 4,7 mm/rok v této lokalitě a čas kolonizace na 2,5 roku. Výsledkem studie je rekonstrukce časového sledu událostí v posledních 120 letech. Ústup ledovce z maxima Malé doby ledové započal mezi lety 1870 – 1880 a byly potvrzeny 3 rozsáhlé povodně v údolích Arco a Colonia v letech 1896/1897, 1914/1917 a 1963, které znatelně ovlivnily populace na odkrytých podkladech. Těchto výsledků dosáhla jak

dendrochronologická, tak lichenometrická část studie, což dokazuje vzájemné podpoření těchto metod a že je vhodné tyto metody vždy kombinovat (Winchester a kol., 2000).

5.5.2 Využití Lichenometrie v pohoří Cordillera Real, Bolívie

Rekonstrukce chronologie Malé doby ledové v Bolívii byla vytvořena pomocí lichenometrických měření provedených na skupině 10 morén ledovce Charquini, který se nachází ve výšce 5392 m n. m., asi 20 km od města La Paz, 16° 17' j. š., 68° 06' z. d.). Pracovalo se s druhem *Rhizocapron geographicum* a měřilo se poměrně novou metodou GEV. Na každém z pěti oddělených svahů lze nalézt 10 morén ve výškách od 4430 do 4960 m n. m. na vzdálenosti mezi 1000 – 1400 metry. Pět těchto morén je vždy výraznějších a odpovídají dlouhodobější stabilizaci ledovce nebo jeho nárůstu, zatímco zbylých 5 morén je drobných a naznačují spíše jen krátkou stagnaci během probíhajícího ústupu ledovce. Morény nejvzdálenější od současného čela ledovce vznikly během maxima Malé doby ledové, které zde proběhlo dle jejich stáří v druhé polovině 17. století mezi lety 1648 – 1700 (Rabatel a kol., 2005).

Další mírný nárůst ledovců byl zaznamenán na začátku 18. století, během let 1722 – 1752. Následoval poměrně výrazný ústup ledovců pouze s dvěma krátkými stagnacemi, který by přerušil jasným nárůstem ledovců až na konci 18. století mezi roky 1781 – 1818. Během 19. století probíhal prakticky nepřerušovaný ústup ledovců, pouze s malým nárůstem okolo roku 1870. Poté již ledovce pouze ustupují až na jedno krátké zastavení na počátku 20. století okolo roku 1910. Vzhledem k tomu, že ledovce od nárůstu v roce 1870 do stagnace v roce 1910 ustoupily přibližně o 250 metrů, lze zde v pohoří Cordillera Real považovat za konec Malé doby ledové období mezi lety 1870 – 1910 (Rabatel a kol., 2005).

Ledovce v Bolívii ustupují od 80. let minulého století velmi rychle (Vincent a kol., 2005). Výška střední sněžné čáry je v pohoří Cordillera Real momentálně 5250 m n. m., což znamená, že místní ledovce nejsou v rovnováze s aktuálním zdejším klimatem a mnoho z nich by mohlo v brzké době zcela zmizet, jako tomu podobně hrozí u ledovců v pohoří Cordillera Blanca (Ramirez a kol., 2001).

Tyto výsledky se velmi dobře shodují s výsledky z pohoří Cordillera Blanca, kde bylo maximum Malé doby ledové zjištěno během let 1590 – 1720 a nárůsty menších rozsahů se vyskytly mezi roky 1780 – 1880 (Rodbell, 1992; Solomina a kol., 2007). Shodují se i v ústupu

ledovců po maximu v 17. století a během téměř celého 19. století. Zrychlující ústup ledovců v 19. století potvrzují i pozorování objevitelů z Peru (Broggi, 1943) a Bolívie (Hastenrath, 1981). Konec Malé doby ledové v těchto regionech tedy nastal okolo roku 1870 v pohoří Cordillera Real, respektive okolo roku 1880 v pohoří Cordillera Blanca.

5.6 Využití Lichenometrie v pohoří Cordillera Blanca

Chronologie Malé doby ledové v pohoří Cordillera Blanca je stále zdokumentována velmi stručně. Jedno z prvních vědeckých pozorování ústupu ledovců v Peru a Ekvádoru pochází z roku 1909 (Sievers, 1914), ale určit kdy přesně ústup začal je velmi těžké a řeší se dodnes. Vědecké výzkumy v pohoří Cordillera Blanca započaly až ve 30. letech, kdy první rakousko-německá kartografická expedice mapovala toto pohoří. V roce 1932 byly popsány mladé morény, které byly přiřazeny k období Malé doby ledové, přičemž ty nejmladší byly vytvořeny krátce před tímto pozorováním (Kinzi, 1942). Dodnes zůstávají informace o průběhu Malé doby ledové v pohoří Cordillera Blanca nedostatečné a značně generalizované.

První lichenometrický výzkum z této oblasti definoval 4 skupiny morén uložených v různých obdobích a to 7000 - 6000, 3350 – 1800, 1250 – 400 a během 20. století. Bohužel všechny kontrolní body pro vytvoření křivky růstu byly získány radiokarbonovou metodou a byly staré 1000 let a více, což činí údaje o morénách z posledního tisíciletí značně nejisté (Rodbell, 1992). Přesnější lichenometrické datování morén v této oblasti je potřebné především proto, aby mohlo být porovnáno a kombinováno společně s metodami jezerních sedimentů z jezera Titicaca a vrtů ledovcových jader z Huascaranu. Výsledkem by měla být daleko lepší chronologie minulé ledovcové činnosti a klimatických změn v této lokalitě (Solomina a kol., 2007).

5.6.1 Výzkumy z let 1996 a 2002

V pohoří Cordillera Blanca tedy proběhly další dva na sobě nezávislé lichenometrické výzkumy morén z Malé doby ledové a to v letech 1996 a 2002. Většina ledovců v tomto pohoří se nachází na velmi strmých svazích ve výškách nad 4500 m n. m. a jsou to tedy ledovce karové nebo svahové. Nachází se zde i několik údolních ledovců, jejichž splazy jsou

však často ve spodní části pokryty silnou vrstvou kamenné suti a podél sebe a před sebou mají čelní a boční morény.

Měření byla provedena na morénách 14 ledovců, z nichž většina je karového typu a menších rozměrů mezi 1 – 1,5 km². Ledovce se nacházejí ve výšce od 4500 do 6000 m n. m. Devět ledovců leží na západních svazích směrem k Pacifiku, pět ledovců na východních svazích směřujících k Atlantiku.

5.6.2 Metodika měření

Měřen byl lišejník rodu *Rhizocarpon* rostoucí na morénách a dalších přírodních a antropogenních površích v celém pohoří. Každá moréna byla považována za samostatný areál a byla důkladně prohledána, aby se našly největší lišejníky. Měření byla prováděna na vrchu čelních morén, nebo na plochých partiích bočních morén. Na každém balvanu větším než 50 cm² byl měřen největší průměr největší stélky průhledným plastovým pravítkem. V každém areálu bylo provedeno co nejvíce měření, až 250 na jedné moréně. Chyba měření byla 0,5 mm. Největší stélka byla považována za anomální, pokud přesáhla svojí velikostí druhou největší stélku o 20 % a více a nebyla následně použita. V každém areálu byl jako ukazatel stáří použit aritmetický průměr 5 největších průměrů stélky. Měření bylo provedeno celkem na 40 bočních morénách a 26 čelních.

Nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím čas potřebný ke kolonizaci substrátu a rychlost růstu je v pohoří Cordillera Blanca rozdíl mezi suchými západními svahy a vlhkými východními svahy. Z toho důvodu byla naměřená data rozdělena do dvou skupin, které byly zkoumány odděleně. Z pohledu teploty, intenzity světla, nadmořské výšky, stability skalního podkladu, vlivu vegetace a druhu lišejníku lze data považovat za homogenní (Solomina a kol., 2007).

5.6.3 Stanovení nových kontrolních bodů

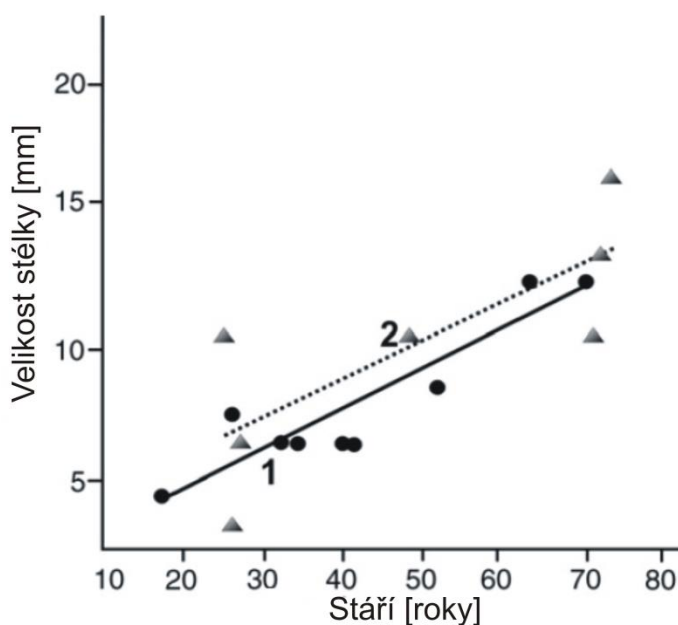
Jediná křivka růstu pro rod *Rhizocarpon* pro oblast pohoří Cordillera Blanca je založena na 8 historických kontrolních bodech a 1 mladé povodňové uloženině. Všechny body se nacházejí nad 3800 m n. m. Absence kontrolních bodů mezi lety 375 +/- 170 a 1941 dělá datování v tomto časovém intervalu velmi nejisté (Rodbell, 1992). Aby se zlepšila přesnost datování v tomto období, přidal nový výzkum několik nových kontrolních bodů. Ty byly měřeny na přírodních i antropogenních objektech z let 900 př. n. l. až 1996 a nacházely

se ve výškách 2500 m n. m. až 4700 m n. m. Z antropogenních objektů byly použity, pro kontrolní body, vstup do dolu Atlante, který byl pokryt v letech 1923 a 1924 přírůstkem ledovce, a kamenná suť odložená při stavbě silnice v 70. letech.

Z přírodních objektů byly studovány morény, výplavové kužely, oblíky, bahnotoky a skalní suť. Stáří těchto objektů bylo zjištěno pomocí starých dokumentů a zpráv, pozemních a leteckých snímků, topografických map pocházejících z období od raného 18. století do 70. let minulého století. Nejstarší historicky zaznamenaný nárůst ledovce v pohoří Cordillera Blanca je nárůst ledovce Atlante mezi lety 1923 a 1924, který dokládají i zprávy místních horníků. Nicméně ledovec jen do roku 1939 ustoupil zpátky o více než 100 metrů (Kinzl, 1942). Ve stejném období, tedy mezi lety 1923 - 1924 došlo k nárůstu ledovcové hmoty i u jiných ledovců, některé z nich téměř dosáhly pozic maxima z Malé doby ledové zřetelně viditelných díky výrazným čerstvým morénám (Kaser a kol., 2002).

5.6.4 Křivka růstu

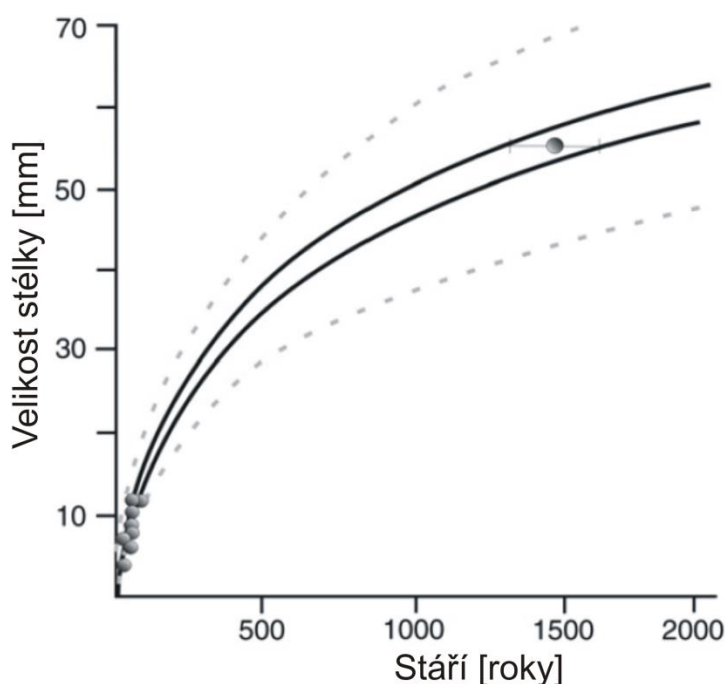
Kontrolní body byly stejně jako naměřená data rozděleny na 2 skupiny podle toho, zda pocházejí ze západních či východních svahů. Pro východní svahy bylo nemožné vytvořit spolehlivou křivku růstu, neboť kontrolních bodů nebylo mnoho, měly velmi široký rozptyl a chyběla data starší než z roku 1920. Nicméně je patrné, že na východních svazích, které mají znatelně vlhčí klima, jsou stélky obecně větší, rostou zde tedy rychleji (viz obr. 5).



Obrázek 5. Lichenometrická studie v pohoří Cordillera Blanca (podle Solomina a kol., 2007)

Kontrolní body rodu Rhizocarpon. 1 – západní svahy směřující k Pacifiku, 2 – východní svahy směřující k Atlantiku.

Skupina kontrolních bodů pro západní svahy je mnohem více konzistentní a je z nich patrný trend růstu lišejníku ve 20. století. Velmi důležitý pro křivku růstu je jeden bod získaný radiokarbonovou metodou datování z morény ledovce Quilloc, Peru (13° 03' 02" j. š., 72° 14' 42" z. d.) starý 375 +/- 170 n. l., což v těchto podmínkách odpovídá velikosti průměru stélky 55 mm (Rodbell, 1992). Jedná se o jediný bod starší více než 80 let. Protože tento zásadní bod nelze objektivně přiřadit k jednomu danému letopočtu, byly vytvořeny dvě křivky růstu založené na dvou opačných krajních odhadech. Stáří lišejníku tedy leží mezi těmito dvěma křivkami (viz obr. 6), (Solomina a kol., 2007). Tato křivka růstu je aplikovatelná pouze na povrchy nacházející se ve výškách nad 3500 m n. m., protože v nižších polohách se lišejník rodu *Rhizocarpon* vyskytuje již jen sporadicky. Kvůli zcela chybějícím kontrolním bodům pro určitou část sledovaného období nelze brát stanovená stáří povrchů za absolutní a mělo by se k nim přistupovat s opatrností.



Obrázek 6. Křivky růstu z lichenometrické studie v pohoří Cordillera Blanca (podle Solomina a kol., 2007)

Kontrolní body a křivky růstu lišejníku rodu Rhizocarpon z pohoří Cordillera Blanca. Křivky růstu pro odhadované maximální a minimální stáří jsou sestavené podle rovnice: $\log(y + c) = a + bx$, kde y je stáří morény v letech, x je velikost lišejníku v mm, a, b, c , jsou konstanty. Dvě křivky jsou hranicemi intervalu nejstaršího a nejmladšího absolutního odhadu stáří kontrolního bodu získaného radiokarbonovou metodou – 375 +/- 170 n. l. Přerušované linie ohraničují 20 % interval chyby pro obě křivky růstu.

5.6.5 Časový rozdíl mezi klimatickou změnou a reakcí ledovce

Lze předpokládat, že stáří morén je velmi blízké obdobím nárůstu ledovcové hmoty, neboť tropické ledovce reagují na změny klimatu mnohem rychleji než ledovce z mírných šířek. Výzkum trvající 20 let, který probíhal na 4 malých ledovcích v pohoří Cordillera Blanca, zjistil korelaci se změnami průměrné roční teploty a srážek se 4letým zpožděním (Kaser a kol., 1990). Vzhledem k relativně menší přesnosti lichenometrického datování v pohoří Cordillera Blanca není toto 4leté zpoždění příliš důležité. Typ, nadmořská výška a rozloha studovaných ledovců se také nijak výrazně neliší, proto lze jejich nárůsty a ústupy považovat za reakce na stejné klimatické signály (Solomina a kol., 2007).

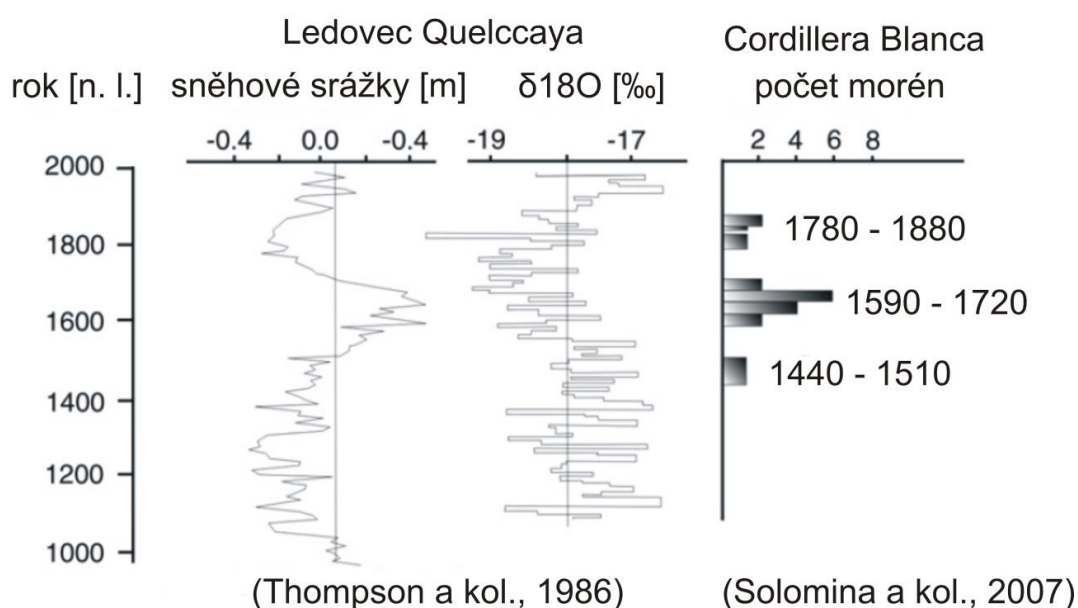
5.6.6 Stáří datovaných morén

Jisté je, že pomocí lichenometrie nelze určit přesné stáří morén, ale ukázalo se, že v pohoří Cordillera Blanca ve výškách nad 3500 m n. m. lze tuto metodu úspěšně využít k určení přibližného stáří morén či antropogenních tvarů. Morény vytvořené v minulém tisíciletí na západní straně pohoří mohou být rozděleny do tří skupin dle jejich morfologie a velikosti lišejníků na nich rostoucích. Nejprve ty, kde je průměr lišejníku roven 10 mm nebo méně, to jsou ty nejmladší ústupové morény. Poté početné, výrazné a vysoké čelní a boční morény, na nichž lze nalézt stélky o velikosti 17 – 23 mm a 28 – 32 mm. A nakonec několik jednotlivých morén s velikostmi lišejníku okolo 37 mm, 50 mm, 59 mm a 64 mm. To znamená, že některé morény, v tomto případě 11 studovaných morén s velikostí stélky 17 – 23 mm a dalších 15 s velikostí 28 – 32 mm, byly uloženy během nárůstu ledovců vyvolaných dvěma různými regionálními klimatickými změnami ve dvou různých obdobích. Velikosti lišejníků na morénách z východních svahů nelze tak jednoznačně sloučit do skupin. Nabízí se pro to několik možných vysvětlení, nejpravděpodobnějším se ovšem jeví rozdílná dynamika ledovců na západní a východní straně pohoří (Solomina a kol., 2007).

Nejvíce morén na západních svazích pohoří Cordillera Blanca vzniklo mezi lety 1590 – 1720. Všech devět studovaných ledovců na této straně pohoří má morénu z tohoto období. Velikost měřených lišejníků se liší jen málo (28 – 30 mm). Tyto morény odpovídají periodě nejvýraznějšího nárůstu ledovců v minulém tisíciletí v tomto regionu a čas jejich vzniku se shoduje s maximem sněhové akumulace v letech 1500 – 1720. Toto maximum bylo zjištěno z ledovcového jádra vrтанého v ledovci Quelccaya, Peru (13° 56' 0" j. š., 70° 50' 0" z. d.) a odpovídá nejvlhčímu období tisíciletí. Navíc relativně nízké hodnoty delta ^{18}O ze stejného

výzkumu naznačují období ochlazení mezi lety 1490 – 1900 (Thompson a kol., 1986). Lze tedy říct, že nárůst ledovců v 17. století byl zapříčiněn jak poklesem teploty, tak nárůstem sněhových srážek.

U 7 z 9 studovaných ledovců ze západních svahů, byly nalezeny morény vytvořené mezi lety 1780 – 1880 a odpovídají velikosti lišejníků 17 – 23 mm. Tyto morény jsou menších rozměrů, naznačují tedy spíše dlouhodobější zastavení ústupu ledovců nebo jen menší nárůst ledovců, který byl pravděpodobně zapříčiněn spíše poklesem teploty, než vyššími sněhovými srážkami.



Obrázek 7. Výsledky lichenometrické studie v pohoří Cordillera Blanca (podle Solomina a kol., 2007)

Porovnání distribuce morén datovaných lichenometrií s rekonstrukcí teploty a sněhových srážek z ledovcového jádra z ledovce Quelccaya.

Tento výzkum tedy potvrzuje, že vrchol Malé doby ledové se v tomto regionu objevil mezi lety 1590 – 1720, kdy vznikly výrazné morény u všech studovaných ledovců. Následoval ještě jeden větší nárůst ledovců mezi lety 1780 – 1880, který už však nedosáhl rozměrů předešlého nárůstu.

5.6.7 Rekalibrace pomocí metody GEV z roku 2007

Nový výzkum rekalibroval křivku růstu lišejníků pro pohoří Cordillera Blanca pomocí nové metody GEV a sběru nových dat. Hlavním výsledkem je potvrzení raného nárůstu ledovců na počátku Malé doby ledové okolo roku 1330 +/- 29 (Jomelli a kol., 2007), o kterém

se dosud spíše spekulovalo. Morény vytvořené tímto nárůstem však byly v naprosté většině případů překryty druhým mnohem mohutnějším nárůstem ledovců okolo roku 1630 +/- 27, který je v pohoří Cordillera Blanca považován za maximum Malé doby ledové. Z tohoto maxima 24 studovaných ledovců do začátku 20. století ustoupilo přibližně o 1000 metrů, což činí asi 30 % jejich délky. Rychlost a rozměr tohoto ústupu je velmi dobře srovnatelný s tím, který dále probíhal ve 20. století. To znamená, že tyto ledovce ustoupily zhruba o 2000 metrů od maxima Malé doby ledové.

Výhodou metody GEV, která zpracovává měření ze známých i neznámých povrchů dohromady, je, že je eliminován přenos chyby měření z první fáze, kdy se měří lišejníky na známých površích a na jejich základě se tvoří křivka růstu, do fáze druhé. Druhou výhodou je, že metoda GEV pracuje s mnohem větším počtem vzorků (Jomelli a kol., 2007). Přesnějších výsledků bylo dosaženo i díky novým měřením na archeologických památkách s čerstvě zjištěným stářím a díky doplňujícím měřením s jinými druhy lišejníku, konkrétně druhy *Lecanora rupicola* a *Orphniospora noriospis*.

U všech studovaných ledovců byly potvrzeny morény vytvořené na začátku 17. století okolo roku 1630 +/- 27, což je považováno za konec období největšího nárůstu ledovců v Peru během Malé doby ledové. Následně docházelo k postupnému ústupu ledovců, který byl několikrát narušen drobnějšími nárůsty ledovcové hmoty, které už však nikdy nedosáhly maxima z počátku 17. století. Tyto nárůsty se objevovaly během 18. a 19. století a nejméně tři různá období tohoto nárůstu lze definovat, vždy však pro jiné ledovce. Povedlo se datovat nárůst v roce 1670 +/- 24, 1730 +/- 21 a 1760 +/- 19 (Jomelli a kol., 2007).

5.6.8 Porovnání s výzkumem v pohoří Cordillera Real

Pokud se srovná chronologie ledovců z pohoří Cordillera Blanca s chronologií pro ledovce z pohoří Cordillera Real v Bolívii, lze pozorovat stejné trendy. Lichenometrický výzkum založený na podobných metodách v Bolívii potvrdil maximum Malé doby ledové v polovině 17. století, ústup začal okolo roku 1660 a byl přerušen přibližně 4 fázemi drobného nárůstu ledovců během 18. a 19. století (Rabatel a kol., 2005). Tyto fáze se shodují s těmi zjištěnými v pohoří Cordillera Blanca. Shoduje se i přibližná délka ústupu ledovců z maxima do počátku 20. století, i v pohoří Cordillera Real je to zhruba 1000 metrů. I v pohoří Cordillera Real došlo k mírnému nárůstu ve 20. letech 20. století (Jomelli a kol., 2007).

6 Ústup zalednění v pohoří Cordillera Blanca

6.1 Zalednění v pohoří Cordillera Blanca

V tropických Andách se nachází v současnosti více než 99 % tropických ledovců, přičemž 20 % z nich lze nalézt v Bolívii, 4 % v Ekvádoru a další 4 % v Kolumbii a Venezuele (Rabatel a kol., 2013). Zbýlých přibližně 72 % všech tropických ledovců se nachází na území Peru a nejrozsáhleji zaledněné pohoří v této zemi je právě pohoří Cordillera Blanca, ve kterém lze najít téměř čtvrtinu všech ledovců v tropech (Vuille, a kol., 2008). Ledovce v Peru ztratily během 18. století přibližně 12 – 17 % své rozlohy a během 19. století 17 – 20 % rozlohy, hodnoty se váží k rozdílu rozsahu zalednění mezi maximem Malé doby ledové a koncem 20. století (Jomelli a kol., 2007). Úbytek ledovců v průběhu 20. století v této oblasti je ještě výraznější a v posledních letech se mu věnuje poměrně dost výzkumů, například (Ames, 1989; Hastenrath, 1999; Georges, 2004; Racoviteanu a kol., 2008; Juen a kol., 2007; Burns a kol., 2013). Modelové studie vycházející z poznatku, že na konci 20. století bylo celkové zalednění pohoří kolem 600 km², ukazují, že výrazný úbytek ledovců v pohoří Cordillera Blanca bude během nadcházejících dekád nadále pokračovat a okolo roku 2080 by v mnoha povodích mohly i zcela zmizet, což bude mít drastické následky na odtok (Juen a kol., 2007).

Odhadovaná rozloha ledovců v pohoří Cordillera Blanca během maxima Malé doby ledové je mezi 850 – 900 km². Další odhad se vztahuje k 30. letům 20. století, tedy těsně po mírném nárůstu ledovců ve 20. letech, odhaduje se rozloha 800 – 850 km². Poté již následuje prokázaný ústup ledovců a odhadovaná rozloha v roce 1970 je 660 – 680 km² a po stále zrychlujícím ústupu v roce 1990 620 km². Podle pozorování po roce 1990 byla rozloha ledovců v pohoří na konci 20. století mírně pod 600 km² (Georges, 2004).

6.2 Rozsah zalednění podle leteckých snímků z roku 1970

V roce 1970 bylo celé pohoří Cordillera Blanca nafoceno pomocí leteckého snímkování. V roce 1989 bylo na základě těchto leteckých snímků spočítáno celkové zalednění o ploše 723,37 km². Průměrná mocnost ledu byla odhadnuta na 31,25 m (Ames, 1989).

Nad stejnými snímky byla provedena další analýza v roce 1999, při které bylo rozeznáno 722 jednotlivých ledovců pokrývajících celkovou plochu o rozloze 723,4 km². Většina ledovců se nachází na západní straně pohoří, kde celkovou plochu 507,5 km² pokrývá 530 ledovců. Zatímco na východní straně pokrývá 192 ledovců plochu velkou 215,9 km² (Hastenrath, 1999). Nejnižší poloha ledovce je ve výšce 4 200 m n. m. 91 % ledovců je klasifikováno jako ledovce svahové – obecně jsou krátké a mají velmi strmý sklon. Zbýlých 9 % jsou ledovce údolní, vyjma jednu ledovcovou čapku a 4 kamenné ledovce (Hastenrath, 1999).

V roce 2004 byla vydána reanalýza fotografií z roku 1970, kdy byly pro porovnání a zpřesnění využity pozemní snímky. Zaledněná plocha byla zjištěna o velikosti 658,6 km², což činí přibližně o 10 % menší výsledek, než byl spočítán v roce 1989 (Georges, 2004). Výsledky výzkumů lze porovnat v tabulce 2.

6.3 Porovnání změny rozsahu zalednění mezi lety 1970 a 2003

6.3.1 Změna rozlohy ledovců

Poslední výzkum vydaný v roce 2008, který se snažil zjistit změnu parametrů ledovců v pohoří Cordillera Blanca mezi lety 1970 a 2003, vytvořil na základě leteckých snímků z roku 1970 databázi ledovců. Konečný výsledkem je 445 ledovců o celkové ploše 665,1 km² (Racoviteanu a kol., 2008). Výsledek je odlišný od toho z roku 1989 především proto, že v každé studii byl jinak definován ledovec. Tentokrát se do rozlohy nepočítaly plochy trvalého sezónního sněhu, kamenné výchozy a morény, nunataky nebo strmé skalní stěny bez sněhu. Ke klasifikaci ledovců z digitalizovaných snímků byla využita klasifikační metoda NDSI (the normalized-difference snow index), která se prokázala jako robustní a lehce aplikovatelný nástroj (Hall, 1995). Pro porovnání a zjištění změn byly využity dva snímky pořízené satelitem SPOT5 v srpnu 2003 na konci období sucha, aby byla minimální plocha pokryta sněhovou pokrývkou a snímky byly bezoblačné. Dva nejsevernější a dva nejižnější masivy musely být dopočítány zvlášť, neboť se nevešly do daných dvou snímků. Ze satelitních snímků byla vytvořena druhá databáze ledovců, která byla následně porovnávána s databází pro rok 1970. Výsledkem klasifikace SPOT snímků je 485 ledovců pokrývajících celkovou plochu o velikosti 516,6 km². 57 ledovců o rozloze 14,9 km², což jsou 3 % celkového zalednění, mělo ledovcový splaz pokrytý sutí (Racoviteanu a kol., 2008).

Zdroj dat/parametr	Letecké snímky 1970			SPOT 2003		
	Minimum	Maximum	Průměr	Minimum	Maximum	Průměr
Výška čela [m n. m.]	4127	5370	4750	4204	5369	4881
Medián výšky ledovce [m n. m.]	4328	5557	5086	4420	5695	5150
Sklon [°]	13	48	31	12	52	32
Orientace [°]	0	359	187	0	359	193
Rozloha [km ²]	0,03	18,44	1,48	0,006	16,17	1,07
Počet ledovců	445			485		
Celková rozloha [km ²]	665,1			516,1		
Změna rozlohy 1970 - 2003 [%]	-22,4					

Tabulka 1. Porovnání výsledků inventarizace ledovců pro rok 1970 a 2003 (podle Racoviteanu a kol., 2008)

Porovnáním výsledků obou databází pro roky 1970 a 2003, které lze podrobněji vidět v tabulce 1, vyplývá několik podstatných změn v parametrech ledovců, které dokazují probíhající dynamickou proměnu zalednění v pohoří Cordillera Blanca. Zatímco v roce 1970 byla zaledněná plocha 665,1 km², v roce 2003 to bylo 516,1 km², což znamená úbytek o 149 km² za 33 let, v procentech 22,4 %, to je 0,68 %/rok. Průměrná velikost ledovce se zmenšila o 0,4 km². Největší úbytek plochy byl pozorován v rozmezí výšek 4 800 a 5 100 m n. m., kde ubylo 80 km² zaledněné plochy. Nebyl nalezen statisticky signifikantní rozdíl mezi úbytkem ledovců na západní a východní straně pohoří (Racoviteanu a kol., 2008). Počet jednotlivých ledovců se zvýšil o 40 kusů, ze 445 na 485, což je pravděpodobně způsobeno dezintegrací větších ledovců v menší. Podobná fragmentace ledovců byla pozorována i v jiných částech světa, například v Alpách (Paul a kol., 2004).

Velikost sledovaných ledovců se pohybuje mezi 0,006 a 16,17 km². Mnohem početnější jsou ledovce s rozlohou menší než 1 km², konkrétně se jedná o 73 % ledovců a 48 % ledovců je dokonce menších než 0,3 km², zatímco ledovců s plochou větší než 10 km² je velice málo. V průměru jsou ledovce na východních svazích o něco málo větší než ty na západních svazích (Racoviteanu a kol., 2008).

6.3.2 Změna nadmořské výšky ledovců

Průměrná nadmořská výška čela ledovce stoupla o 113 metrů a medián nadmořské výšky ledovce průměrně stoupl o 66 metrů, což dokazuje posun ledovců do vyšších nadmořských výšek, přičemž tento výškový ústup byl výraznější na východní straně pohoří. Zajímavým poznatkem je, že ledovce, které mají ledovcový splaz pokrytý sutí, odtávají

pomaleji. Konkrétně byl u 19 takovýchto ledovců sledován průměrný úbytek plochy o 13,3 %, což je o 8,7 % méně, než u celého zalednění (Racoviteanu a kol., 2008).

Čela zkoumaných ledovců se nacházela v rozmezí 4204 – 5369 m n. m., průměrně tedy ve výšce 4881 m n. m. Průměrně jsou čela ledovců na západních svazích o 102 m výše než ty na východních svazích (4914 a 4812 m n. m.). Výška mediánu ledovců je mezi 4420 a 5695 m n. m. a průměrně ve výšce 5150 m n. m. Ledovce na západních svazích mají medián o 116 metrů výše, než ledovce na východních svazích (Racoviteanu a kol., 2008). Výška mediánu klesá od jihozápadu k severovýchodu, tento trend je v souladu s orografickým efektem pohoří Cordillera Blanca, kdy vyšší srážky na východě pohoří způsobují, že se čela ledovců dostanou do nižších nadmořských výšek (Kaser a kol., 1997).

6.4 Rozsah zalednění podle satelitních snímků z roku 2010

A jedna z posledních studií sledujících úbytek ledovců v pohoří Cordillera Blanca mezi lety 1987 a 2010 za využití satelitních snímků ze satelitů Landsat 2, 5, a 7, ASTER a QuickBird, podpořila důkazy pro zrychlující trend ústupu ledovců. Výzkum zjistil zaledněnou plochu v pohoří Cordillera Blanca v roce 1987 o velikosti 643,5 km², zatímco v srpnu roku 2010 zaledněná plocha činila už pouze 482,4 km². To činí ztrátu 161 km² během 23 let, což je zmenšení o 25 % od roku 1987. Vše ukazuje na to, že ústup ledovců v tomto pohoří neustále zrychluje, mezi lety 2004 a 2010 ztratily ledovce v pohoří Cordillera Blanca plochu o rozloze 87 km², což je ztráta 2,5 % ročně z jejich rozlohy v roce 2004. To je dosud nejrychlejší pozorovaný ústup zdejších ledovců, rychlost ztráty plochy zalednění byla v tomto období 3,5x větší než průměrná rychlost mezi lety 1970 a 2003 (Burns a kol., 2013).

Druhá studie využívající snímky z roku 2010 provedená na skupině ledovců Nevados Caullaraju - Pastoruri nacházejících se v jižní části pohoří Cordillera Blanca přibližně na souřadnicích 9° 56' j. š. a 77° 13' z. d. zde sledovala ústup ledovců mezi lety 1975 a 2010. Výsledkem je zjištění, že zdejší ledovce v tomto období ustupovaly průměrnou rychlostí 4,5 km² za dekádu, s celkovou ztrátou 22,5 km² zaledněné plochy, což dělá 58 % (Durán-Alarcón a kol., 2015).

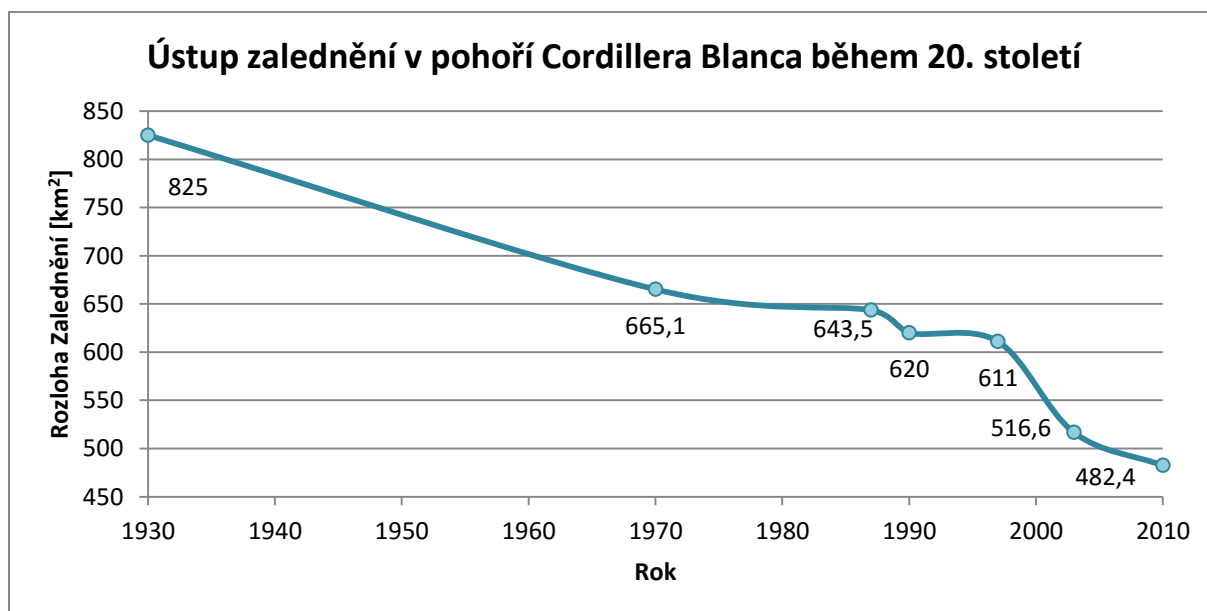
Z výše uvedených výzkumů a studií je prokazatelné, že ledovce v pohoří Cordillera Blanca již od 1. pol. 20. století nepřetržitě odtávají, rozpadají se na menší ledovce a ustupují

do vyšších nadmořských výšek. Společně s prokázaným trendem dlouhodobého růstu průměrné roční teploty vše nasvědčuje tomu, že relativně malé ledovce v pohoří Cordillera Blanca nejsou v rovnováze se současným lokálním klimatem a lze tedy předpokládat jejich další poměrně výrazný ústup, který může mít drastické následky nejen na vodní režim v zasažené oblasti, ale také na spoustu místních ekosystémů a především pak na místní obyvatelstvo a ekonomiku.

Rok	Autor studie	Rozloha [km ²]
1630 +- 27	Georges, 2004	850 - 900
1930	Georges, 2004	800 - 850
1970	Racoviteanu a kol., 2008	665,1
1987	Burns a kol., 2013	643,5
1990	Georges, 2004	620
1997	Morales - Arnao, 1999	611
2003	Racoviteanu a kol., 2008	516,6
2010	Burns a kol., 2013	482,4

Tabulka 2. Vývoj rozlohy zalednění v pohoří Cordillera Blanca

Tabulka zachycuje vývoj rozlohy zalednění v pohoří Cordillera Blanca od maxima Malé doby ledové dodnes, tak jak jej spočítali autoři různých studií pro různé roky. Hodnota pro rok 1630, je odhad rozlohy ledovců během maxima Malé doby ledové založený na především na lichenometrických měřeních, nevztahuje se tedy k žádným leteckým ani satelitním snímkům.



Obrázek 8. Graf ústupu zalednění v pohoří Cordillera Blanca během 20. století

6.5 Vzdálenost ústupu čel ledovců

Co se týče vzdálenosti ústupu čela ledovce, existuje několik různých pozorování na různých ledovcích v pohoří Cordillera Blanca. U ledovce Artesonraju došlo mezi lety 1932 - 1987 k ústupu čela ledovce o 1140 metrů. Ledovec Broggi ustoupil mezi roky 1932 – 1994 o 1079 metrů. U ledovce Pucaranra to bylo za stejné období 690 metrů, 675 metrů dlouhý ústup byl sledován za stejnou dobu u ledovce Uruashraju (Ames, 1998). Ledovec Yanamarey ustoupil o 552 metrů. Při hrubém shrnutí lze hovořit o ústupu ledovců v pohoří Cordillera Blanca během 20. století na vzdálenost 500 – 1200 metrů, to se shoduje i se zjištěním z jiné lichenometrické studie, kde se došlo k výsledku, že sledované ledovce během 20. Století ustoupily o 1000 metrů (Jomelli a kol., 2007). Od maxima Malé doby ledové do začátku 20. století stejné ledovce ustoupily o velmi podobnou vzdálenost jako během 20. století, tedy přibližně také o 1000 metrů. Všechny tyto výsledky lze tedy shrnout tak, že ledovce v pohoří Cordillera Blanca od maxima Malé doby ledové do konce 20. století ustoupily o vzdálenost asi 1000 – 2000 metrů, vždy podle konkrétních podmínek.

6.6 Ústup střední sněžné čáry

Pokud se u některých ledovců v pohoří Cordillera Blanca zachovala moréna z rané fáze Malé doby ledové, tedy ze 14. století, vždy se nachází velmi blízko morénám z maxima Malé doby ledové ze 17. století. To nasvědčuje tomu, že v tomto pohoří se střední sněžná čára zhruba mezi rokem 1350 a polovinou 18. století nacházela přibližně ve stejné nadmořské výšce. Od maxima Malé doby ledové do konce 19. století vystoupala střední sněžná čára asi o 108 +/- 30 metrů. Ještě rychleji a výrazněji v případě některých ledovců vystoupala střední sněžná čára mezi roky 1930 – 2000 a to o 130 metrů (Jomelli a kol., 2007). Podle výzkumu v Ekvádoru zde střední sněžná čára vystoupala o 200 – 300 metrů od 18. století do konce 20. století a nachází se dnes v přibližné výšce 5030 m n. m. (Cáceres a kol., 2004), což je srovnatelné s aktuální výškou střední sněžné čáry v pohoří Cordillera Blanca, která je mezi 4850 – 5100 m n. m. (Paraj, 2015). Ve Venezuele se odhaduje, že střední sněžná čára za podobné období vystoupala o 300 – 500 metrů (Polissar a kol., 2006). Ústup střední sněžné čáry je tedy srovnatelně podobný v celém regionu tropických And.

6.7 Vliv ústupu zalednění na vodní režim v regionu Cordillera Blanca

Od roku 1930 do roku 2009 se zaledněná plocha ve všech zkoumaných povodích zmenšila. Pro celé povodí horního toku řeky Río Santa je průměrná hodnota roční ztráty plochy zalednění 0,61 %/rok mezi lety 1930 - 2009. Hodnoty ztráty plochy zalednění se v jednotlivých povodích pohybují mezi 0,38 %/rok a 1,1 %/rok. Mezi lety 1990 – 2009 byla hodnota roční ztráty zalednění pro horní tok řeky Río Santa už dokonce 0,81 %/rok (Baraer a kol., 2012).

Předvídat následky ústupu zalednění na vodní režim navázaných řek je obzvláště ve vysokohorských oblastech nesmírně těžké kvůli složitosti celého procesu a kvůli často nedostatečně podrobným nebo zcela chybějícím datům, která se v těchto oblastech těžko získávají, proto nelze brát výsledky těchto studií za absolutní, neboť mohou být zatíženy chybou pocházející z různých fází výzkumu (Baraer a kol., 2012).

6.7.1 Vývoj odtoku

Během svého ústupu zdejší ledovce generují dočasný nárůst odtoku v povodích na sebe vázaných řek. Tento nárůst je však časově omezen, neboť množství vody uložené v podobě ledu v ledovci postupně klesá, jak hmota ledovce odtává a on ustupuje. Důsledkem toho tedy je, že roční odtok se po dobu několika let nebo i dekad značně navýší, ale o to výraznější pokles bude potom následovat (Mark a kol., 2007). Tento pokles bude ještě silnější v obdobích sucha, kdy je příspěvek tající vody z ledovců k celkovému odtoku nejviditelnější (Stahl a kol., 2006). Voda přitékající z tajících ledovců významně zmírňuje meziroční rozdíly hodnot ročních odtoků, velmi ale záleží, jak velký podíl plochy povodí je zaledněn. Nejvíce je tento tlumící efekt znatelný u povodí, kde je zaledněno mezi 20 – 50 % plochy. Naopak největší rozdíly v odtoku se vyskytují v povodích bez zalednění nebo v povodích silně zaledněných (Hagg a kol., 2005).

Výsledkem hydrologické studie z roku 2012 je zjištění, že většina povodí nacházejících se v oblasti pohoří Cordillera Blanca již vykazuje meziročně klesající trend odtoku během období sucha. Tento trend bude dále pokračovat, jak bude vliv ledovců na celkový odtok klesat s jejich zmenšujícím se rozsahem. Z prezentovaných výsledků lze předpokládat, že až dojde k úplnému roztátí zdejších ledovců, klesne roční odtok o 2 – 30 % vzhledem

k současnému odtoku, podle jednotlivých povodí. Vliv ústupu ledovců je na odtoku mnohem více patrný během období sucha než během zbytku roku.

6.7.2 Povodí horního toku řeky Río Santa

Na horní části toku řeky Río Santa roztátí ledovců s velkou pravděpodobností povede ke snížení odtoku během období sucha o 30 % vzhledem k současným hodnotám, v jednotlivých částech povodí to však může být pokles až o 60 – 70 % oproti současnosti (Baraer a kol., 2012).

Co se týče řeky Río Santa, voda z tajících ledovců tvoří asi 10 – 20 % jejího ročního odtoku a během období sucha může tato hodnota vystoupat až na 40 % (Mark a kol., 2003). Zatímco průměrná roční teplota se mění jen málo a ablace ledovce probíhá prakticky v průběhu celého roku, distribuce srážek během roku v této oblasti není vyrovnaná. 80 % srážek spadne během období dešťů od října do dubna a akumulace ledovců se tedy objevuje pouze během této periody roku a v současnosti už jen ve vyšších partiích ledovců (Baraer a kol., 2012).

Přestože se v povodí horního toku řeky Río Santa ještě stále nachází významné množství ledovců, klesající trend odtoku během období sucha je snadno pozorovatelný už dnes a bude pokračovat a sílit. Tato skutečnost představuje ve velmi blízké budoucnosti nezanedbatelné riziko pro místní ekosystémy, obyvatelstvo i ekonomiku (Bury, 2011).

7 Metodika práce

Bakalářská práce sestává ze dvou základních částí, a sice rešeršní části a části praktické, kde je provedena vlastní analýza dat o vybraných ledovcích.

7.1 Rešerše odborné literatury

První část bakalářské práce je podrobnou rešerší literárních odborných zdrojů pojednávajících a zabývajících se tématy, které jsou v bakalářské práci zpracovány. Cílem rešeršního výzkumu bylo obsáhnout aktuální poznání v oblasti klasifikace ledovců především v DPZ, časové zařazení Malé doby ledové v různých světových regionech, poznání v oblasti lichenometrického datování tvarů reliéfu a publikované informace o ústupu zalednění v pohoří Cordillera Blanca od Malé doby ledové. I ostatní výše uvedená témata byla rešeršně zpracována se zaměřením na region pohoří Cordillera Blanca. K rešerši bylo využito několik českých zdrojů, ale naprostá většina rešerše je tvořena z literatury světových autorů téměř vždy psané v angličtině. Nejčastěji se jednalo o odborné články a studie publikované v různých vědeckých časopisech, například *New Phytologist*, *Holocene*, *Arctic, Antarctic and Alpine Research Journal*, *Quaternary Research*, *Geomorphology*, *Global and Planetary Change* a další. Dále byly využity odborné knihy a encyklopedie a několik elektronických zdrojů.

7.2 Metodika vlastní analýzy vybraných ledovců

7.2.1 Volba software

Cílem analýzy bylo rozeznat na snímcích ledovce a k nim patřící morény a vypočítat rozlohu jednotlivých ledovců v současnosti a minulosti, mnohdy se jednalo o ledovce velmi malých rozměrů i pod 1 km² (Yanamarey má dnes rozlohu pouze 0,25 km²). Studované morény jsou navíc ještě mnohem menší než ledovce, mnohdy se jedná o několik málo metrů široký a vysoký tvar reliéfu táhnoucí se krajinou v okolí ledovce. Volně přístupných satelitních snímků zachycujících pohoří Cordillera Blanca v takovém rozlišení, aby na nich bylo možné detailně rozeznávat tyto tvary reliéfu malých rozměrů, v tak topograficky složitém terénu, a navíc pořízených přibližně v posledních 5 letech, není mnoho. Jako nejlepší se jeví snímky z družice Landsat 8, které jsou zdarma k dispozici veřejnosti. Tato družice má rozlišení

v multispektrálním pásmu 30 metrů, v panchromatickém pásmu 15 metrů, a i když by se analýza dala bez zásadních problémů provést v pásmu panchromatickém, není toto rozlišení 15 metrů stále ideální.

Další možností bylo zkoumat rozlohu ledovců pomocí aplikace Google Earth Pro. Ta sice postrádá oproti specializovaným programům pro dálkový průzkum Země, jako je například ENVI, mnoho funkcí a velmi těžko se u ní shánějí podrobná metadata jednotlivých snímků, naproti tomu ale nabízí velmi aktuální snímky kvalitních parametrů s velmi vysokým rozlišením prakticky pro celý svět. Konkrétně pro pohoří Cordillera Blanca pocházely snímky z družic World View 2 a Pléiades s rozlišením 0,5 metru a byly pořízeny v rozpětí let 2013 – 2016. Další výhodou tohoto programu je možnost zobrazení snímku společně s digitálním modelem reliéfu ve 3D, což u této konkrétní analýzy bylo poměrně často využito při rozhodování, kudy správně vytyčit hranici ledovce.

Jak už bylo řečeno v kapitole 3.6, kvůli mnoha obtížnostem a technickým limitům je identifikace ledovců ve vysokohorských oblastech velmi náročná, ještě těžší je pak snaha tuto identifikaci automatizovat. Existují už sice automatické klasifikační postupy, nejčastěji využívající index NDSI (Normalized Difference Snow Index), který je založený na vysoké odrazivosti sněhu ve viditelné části spektra a naopak na vysoké absorpci záření na sněhu v pásmu blízkého infračerveného záření (Hall a kol., 2014), ale tyto klasifikační postupy se stále potýkají s nepřesnostmi. Těžko se vypořádávají se zastíněným ledovcem nebo s ledovcem pokrytým horninovou sutí. Tyto klasifikační postupy se velmi rychle zdokonalují a mohou být zajímavým námětem pro další výzkum. Obzvláště pro vysokohorské ledovce se ale stále doporučuje, je-li to možné, používat klasifikaci manuální, kterou provede lidský odborník.

Vzhledem k výše zmíněným problémům s přístupností kvalitních a co nejaktuálnějších dat pro tuto oblast, s požadavkem na specifické funkce, s rozhodnutím klasifikovat ledovce manuálně a zčásti i osobním zájmem vyzkoušet si podrobnější práci s programem Google Earth Pro, byl zvolen k analýze právě tento program.

7.2.2 Zdroje dat

7.2.2.1 Poskytovatelé satelitních snímků

Snímky pro aplikaci Google Earth dodávají různí externí komerční poskytovatelé, v současnosti je nejvíce satelitních snímků viditelných v aplikaci Google Earth od dvou poskytovatelů, a sice Digital Globe a bývalé Astrium dnes spadající pod divizi Airbus Defence and Space společnosti Airbus Group.

Předtím než Google vloží snímky do své databáze a zpřístupní je skrze aplikaci Google Earth, jsou snímky upraveny celou řadou procesů. Konkrétně snímky od poskytovatelů Digital Globe a Airbus Defence and Space prochází procesem zvaným pansharpening, kdy dochází ke zkombinování dat z pásma panchromatického s daty z pásem multispektrálních, která mají nižší rozlišení. Výsledkem jsou multispektrální data s vyšším rozlišením odpovídajícím rozlišení panchromatického pásma. U těchto poskytovatelů je pansharpening prováděn ještě na jejich straně. Stejně tak tito poskytovatelé snímky georeferencují (Digital Globe, 2015; Airbus Defence and Space, 2015; Becek, 2011).

Zda je georeferencování zkontrolováno nebo provedeno na straně Googlu znovu a zda jsou snímky i ortorektifikovány, je pro konkrétní snímky skoro nemožné zjistit, stejně tak jakým konkrétním postupem je se snímky nakládáno. Tyto informace Google ani jeho poskytovatelé dat veřejně nepublikují. Podobně se v programu Google Earth nedají dohledat ani metadata jednotlivých snímků, která lze pouze poměrně složitě manuálně dohledat v databázích poskytovatelů satelitních snímků a i tak ve značně omezené podobě.

7.2.2.2 Přesnost snímků

Nicméně v rámci vlastní analýzy byl proveden malý experiment. Bylo vybráno 8 bodů v různých částech světa, většinou se jednalo o rohy budov a byla u nich porovnána jejich přesná poloha zaznamenaná pomocí souřadnic mezi programy ArcGis 10.2 a Google Earth Pro. V ArcGis 10.2 byla využita mapová služba World Imagery, která poskytuje volný přístup k satelitním snímkům z celého světa. Na některých místech nabízí snímky s rozlišením až 0,3 metru, někde se ovšem jedná o snímky s nižším rozlišením, například většina pohoří Cordillera Blanca je nasnímaná družicí Landsat s rozlišením 30 respektive 15 metrů. Snímky jsou většinou staršího data, než ty publikované v programu Google Earth. Snímky ve World Imagery jsou také georeferencované a jsou zpracovávány jak firmou ESRI tak samotnými uživateli (ArcGis, 2016).

Zaměřený objekt	Zeměpisná šířka	Zeměpisná délka	Změřená odchylka [m]	Rozlišení ve World Imagery [m]	Přesnost ve World Imagery [m]
Roh budovy v Huarazu, Peru	77°31'49,622"Z	9°31'33,915"J	5,5	0,5	10,2
Křižovatka polních cest na úpatí pohoří CB	77°27'19,159"Z	9°29'36,419"J	8,15	0,5	10,2
Roh budovy v krajině pod pohořím CB	77°24'21,987"Z	9°46'52,671"J	9,87	0,5	10,2
Roh budovy v Huari, Peru	77°10'21,227"Z	9°20'56,055"J	0,89	0,5	10,2
Serpentina pod ledovcem Cancaraca 1, CB, Peru	77°30'18,731"Z	9°8'25,183"J	5,03	0,5	10,2
Roh hlavního nádraží Praha	14°26'13,842"V	50°5'1,718"S	0,44	0,5	10
Roh pošty na Sněžce	15°44'24,492"V	50°44'9,298"S	5,78	0,5	10,2
Roh Westminsterského paláce, Londýn	0°7'31,906"Z	51°29'53,633"S	0,3	0,3	2,72

Tabulka 3. Parametry zaměřených bodů a jejich odchylka mezi programy ArcGis 10.2 a Google Earth Pro

Z tabulky 3 lze vidět, že body nacházející se v různých částech světa byly v programu ArcGis zpracovávány nad snímky se stejným nebo lepším rozlišením, než mají snímky dostupné v programu Google Earth. Snímky nad stejným bodem ovšem vždy pocházely z jiného období. Zatímco v programu Google Earth byly snímky z let 2013 – 2016, v programu ArcGis byly zpracovány snímky z období 2010 – 2011. Výsledné odchylky se pohybují od 0,3 metru po 9,87 metrů. O něco vyšší odchylky se vyskytují v hornatém terénu, viz body v pohoří Cordillera Blanca, nebo bod na Sněžce. Aritmetický průměr odchylky je 4,485 metrů a medián odchylky je 5,265 metrů. Takový rozdíl je velmi malý, i když mírně narůstá ve složitém terénu a snímky nad kterými byla prováděna analýza lze považovat tedy za velmi kvalitně georeferencované a přesné. Vzhledem k tomu, že se analyzují tvary v řádech několika km², lze tyto snímky bez problému k analýze využít, aniž by její výsledky byly výrazně ovlivněny chybou z tohoto procesního kroku.

Výzkum z roku 2008 zabývající se horizontální poziční přesností snímků programu Google Earth zkoumal 436 kontrolních bodů po celém světě. U ortorektifikovaných snímků Landsat GeoCover vyšla RMSE chyba přesnosti menší než 50 metrů. Relativně k Landsat snímkům mají body v programu Google Earth chybu přesnosti RMSE 39,7 metrů, v rozvinutých zemích 24,1 metrů (Potere, 2008). Vzhledem k tomu, že přesnost aplikace Google Earth je neustále vylepšována spolu s tím jak do ní přibývají snímky s mnohem vyšším

rozlišením, a že tento výzkum je již 8 let starý, lze společně s vědomím toho, že budou analyzovány relativně velké tvary, konstatovat, že aplikace Google Earth je poměrně přesný nástroj, který lze využít k dálkovému průzkumu Země.

7.2.2.3 Použité snímky

Pléiades je sestava dvou satelitů Pléiades 1A a 1B nesoucích optické senzory s velmi vysokým rozlišením. Satelity se pohybují po stejné oběžné dráze 180° od sebe, tedy naproti sobě a byly vypuštěny v roce 2011. Pro komerční účely snímky dodává společnost Airbus Defence and Space, dříve Astrium. Rozlišení chromatického pásma je 0,5 m, multispektrálních pásem 2 m (Airbus Defence and Space, 2015). Pro tuto analýzu bylo z těchto satelitů použito 6 snímků pořízených v rozmezí let 2013 – 2016 s oblačností 0 – 7,9 %. Tyto a další parametry jednotlivých snímků lze najít v tabulce 4 níže.

WV2 neboli World View 2 je komerční satelit firmy Digital Globe, který dodává na trh satelitní snímky s velmi vysokým rozlišením, v panchromatickém pásmu 0,46 m a 1,8 m v multispektrálním pásmu. Na oběžnou dráhu byl vypuštěn 8. října 2009 (Digital Globe, 2015). Snímek pocházející z družice WV2, který byl použit, je výsledkem kombinace pásem PAN-MS1-MS2. Snímek byl pořízen dne 29. 1. 2014 a oblačnost na snímku dosahuje 18 %, viz tabulka 4.

Datum pořízení snímku	Družice	Oblačnost [%]	Rozlišení [m]	Azimut slunce [°]	Výška Slunce [°]
29.1.2014	World View 2	16,00%	0,5	-	-
28.4.2016	Pléiades	7,90%	0,5	45,1949	56,6424
28.4.2016	Pléiades	0,30%	0,5	44,743	56,5847
20.8.2013	Pléiades	1,50%	0,5	45,8772	59,2243
20.8.2013	Pléiades	0,70%	0,5	48,5506	57,7789
20.8.2013	Pléiades	0,20%	0,5	48,7898	57,6867
21.6.2015	Pléiades	0,00%	0,5	36,4435	49,7104

Tabulka 4. Parametry satelitních snímků použitých při analýze

7.2.3 Metodika polygonového měření ledovců

K analýze bylo vybráno 14 ledovců v pohoří Cordillera Blanca, u kterých výzkum z roku 2007 našel čelní nebo boční morény, které pomocí lichenometrického měření časově zařadil k maximu Malé doby ledové, tedy mezi roky 1590 – 1720 (Solomina a kol., 2007), pozdější studií pak ještě upřesněno do roku 1630 +/- 27 (Jomelli a kol., 2007). Morény

ohraničující rozsah daných ledovců během maxima Malé doby ledové jsou dnes tedy staré přibližně 386 let. Snahou této analýzy bylo určit, o jak velkou plochu přišly během tohoto 386 let dlouhého období, během něhož již většinu čas ustupovaly.

7.2.3.1 Popis měření dat

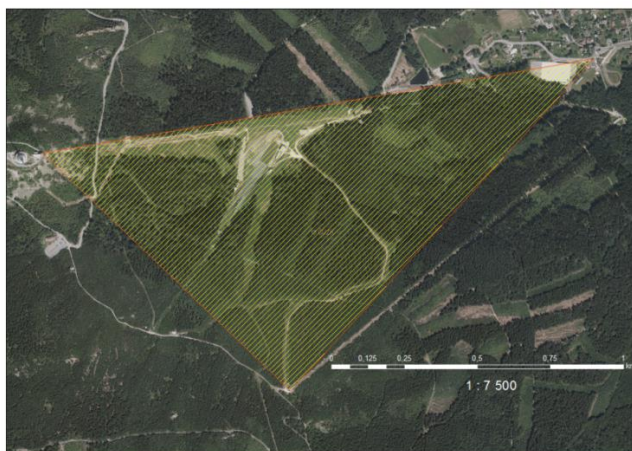
Především kvůli specifickým požadavkům na kvalitu a aktualitu satelitních snímků, zmíněným výše, bylo rozhodnuto, že se pro analýzu ledovců využije program Google Earth Pro. Ledovce byly identifikovány a zaměřeny nad satelitními snímky z družic Pléiades a World View 2, podrobněji výše. Měření bylo prováděno při konstantní výšce pohledu 1 km s nulovým náklonem pohledu, tedy pohledem kolmo ke snímku a severem přímo nahoře. 3D digitální model reliéfu byl po dobu měření plochy ledovce vypnut.

Po zaměření polygonu byla funkce terénu zapnuta a byla provedena korekce vytyčené hranice ledovce za pomoci digitálního modelu terénu. Digitální model terénu používaný aplikací Google Earth nepochybně nedosahuje takové přesnosti, jako modely používané v odborných aplikacích, obzvláště v takto členitém terénu bude jeho nepřesnost růst, i přesto je ale nutné uvést, že tato funkce byla velmi často nápomocna při korektuře hranic. Nejčastěji se jednalo o situaci, kdy byla hranice vytyčena již na druhé straně svahu, další obvyklou situací bylo přexponované místo na snímku, kde nebylo možné rozeznat terénní nerovnosti.

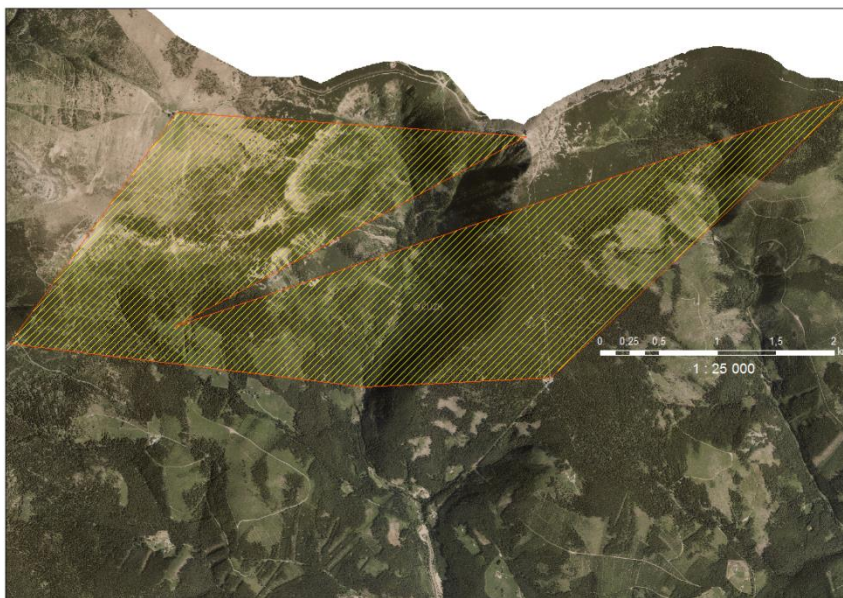
7.2.3.2 Kontrolní polygonové měření

Pro měření byla využita funkce polygonového měření plochy, která je v programu součástí nástrojového balíčku Pravítko. Předtím, než byly měřeny samotné ledovce v pohoří Cordillera Blanca, byla provedena kontrola přesnosti polygonového měření v aplikaci Google Earth Pro. Byly zaměřeny dva testovací polygony na území České republiky ve dvou různých programech, nad dvěma různými typy snímků. Nejprve byly zaměřeny v programu Google Earth Pro nad kombinací leteckých (Geodis Brno) i satelitních snímků (družice World View 2), následně v programu ArcMap 10.2 nad leteckými snímky Ortofoto České republiky poskytnutými ČÚZK. Testovací polygony byly zaměřeny na území s co největším výškovým rozdílem na krátkých vzdálenostech, aby byly co nejlépe simulovány podmínky z pohoří Cordillera Blanca. Body představovaly rohy budov, konkrétně u polygonu Sněžka rohy známých horských chat. Velikost polygonů byla rozdílná, polygon Ještěd měl 0,9 km², zatímco polygon Sněžka měl 9,38 km², aby bylo pokryto celé rozpětí velikosti rozlohy

ledovců. Použité polygony lze vidět na obrázcích 8 a 9 jejich změřené parametry z obou programů v tabulce 5 a 6.



Obrázek 9. Testovací polygon Ještěd



Obrázek 10. Testovací polygon Sněžka

Testovací polygon Ještěd	Google Earth Pro 7.1.1	Arc Map 10.2
Plocha [km ²]	0,9	0,9
Plocha [m ²]	900 040	902 876
Perimetr [m]	4 634	4 626

Tabulka 5. Parametry testovacího polygonu Ještěd

Testovací polygon Sněžka	Google Earth Pro 7.1.1	Arc Map 10.2
Plocha [km ²]	9,38	9,38
Plocha [m ²]	9 380 409	9 381 548
Perimetr [m]	23 079	23 060

Tabulka 6. Parametry testovacího polygonu Sněžka

Rozdíl mezi rozlohou testovacího polygonu Ještěd určenou programy ArcMap a Google Earth je 2836 m², což je pouze 0,3141 %. U testovacího polygonu Sněžka byl rozdíl dokonce jen 1 139 m² tedy 0,0121 %. Rozdíl v délce perimetru byl 8 a 19 metrů. Takto malé rozdíly umožňují konstatovat, že polygonové měření aplikace Google Earth je podobně přesné jako to které nabízí odborný program ArcMap a jiné. Je tedy možné ho bez zásadních problémů použít k analýze velikosti tvarů tak velkých jakým jsou studované ledovce v pohoří Cordillera Blanca, i když lze předpokládat mírné zhoršení přesnosti z důvodu velmi složité topografie v zájmové lokalitě.

7.2.3.3 Identifikace konkrétních morén z maxima Malé doby ledové

Důležitým faktorem pro co nejlepší výsledky bylo správně lokalizovat na satelitním snímku morény z maxima Malé doby ledové pro daný ledovec, neboť právě tou morénou je vždy ohraničena přibližná maximální rozloha ledovce během Malé doby ledové. Morény byly lokalizovány manuálně a jednotlivě dle informací získaných z různých zdrojů. Nejdůležitějším zdrojem byla lichenometrická studie z roku 2007, z které pochází i 14 měřených ledovců (Solomina a kol., 2007). Odtud byly čerpány informace, k jakému ledovci moréna patří, na jakou světovou stranu je orientována a její přibližná nadmořská výška. Shodu v nadmořské výšce bylo vzhledem k přesnosti digitálního modelu reliéfu používaného v programu Google Earth Pro nutno brát s rezervou. Pro některé morény článek obsahoval i bližší popisy, zda se jedná o čelní nebo boční morény, nebo zda moréna hradí jezero a další doprovodné informace. Například pro ledovec Atlante je zde popisován jeho nárůst během 20. let 20. století ke vstupu do stejnojmenného dolu, tento nárůst však nepřekonal maximum Malé doby ledové.

Ke správné identifikaci byly využity i další zdroje, které se zabývají u daných ledovců obdobím Malé doby ledové, nebo jej nějakým způsobem zmiňují. Pro ledovec Llaca byly čerpány informace o dané moréně ze článku shrnujícího dlouhodobější pozorování rychlosti ústupu tohoto ledovce (Pelto, 2010). Pro ledovec Pucajirca Norte byly získány doplňující

informace ze studie jezer Safuna hrazených morénymi ležícími pod tímto ledovcem (Reynolds, 2003). V neposlední řadě byly využity také historické snímky, které jsou pro některé ledovce dostupné na internetu. Asi nejužitečnější byly historické snímky ledovce Broggi, který je v posledních letech na velmi rychlém ústupu (viz obr. 11).



Obrázek 11. Historické snímky ledovce Broggi zaznamenávající jeho výrazný ústup během 20. století. Zleva (Kinzl 1932), (Braasch 1999), (Braasch 2014)

Přes veškerou snahu najít ke každému ledovci a moréně co nejvíce informací a následně je správně lokalizovat, se z důvodu poměrně stručných a nedostačujících informací a studia pouze pomocí satelitních snímků a ne na místě jedná o část, která může společně s nesprávným vytyčením hranic ledovce výsledky zatížit subjektivní chybou nejvíce.

7.2.3.4 Měření ledovců pomocí polygonů

Pomocí funkce polygonového měření byl vytyčen polygon ohraničující současný rozsah ledovce. Během vymezování polygonu byla vyvinuta maximální snaha dodržovat pravidla pro digitální klasifikaci ledovce. Do rozlohy ledovce byly započítány pouze ty části, které přispívají do ledovcového splazu sněhem a ledem, výjimka byla udělána pouze u ledovce Broggi, který se rozpadl na dvě přibližně stejně velké samostatně existující části. Velmi náročné bylo vytyčit hranici v zastíněných partiích ledovce, v dolní části ledovcových splazů silně pokrytých horninovou sutí a občas bylo nemožné vyloučit z polygonu strmé skalní stěny menších rozměrů nepokryté ledem, nicméně tyto plochy nikdy nedosahovaly výrazně větších rozměrů a jejich výskyt nebyl častý. Při interpretaci výsledků je tedy vhodné mít na paměti, že dosažené výsledky mohly být v této části procesu zatíženy určitou chybou způsobené zčásti technologickými limity zčásti lidským zaviněním.

Polygon ohraničující rozsah současného zalednění byl následně upraven, tak aby ohraničoval pravděpodobný rozsah ledovce během maxima Malé doby ledové. Byla tedy

ohraničena rozloha současného ledovce, k tomu byla ale navíc vedena hranice dřívějšího rozsahu po hřbetu čelních a bočních morén časově zařazených k maximu Malé doby ledové. Následně se polygon rozšířil o plochy, které byly podle morfometrických předpokladů a podle polohy morén a současného ledovce dříve taktéž zaledněny a tvořily součást zkoumaného ledovce. Výsledné rozlohy byly zaznamenány do tabulky a dále zpracovány.

7.2.3.5 Dodatečná pozorování

Nakonec bylo ještě provedeno měření nadmořské výšky čela ledovce v současnosti a v době maxima Malé doby ledové vytvořením linie kopírující přibližný ústup čela ledovce. Linie byla vytvořena též funkcí, kterou lze nalézt v nástrojovém balíčku Právítka programu Google Earth Pro. Z délky linie bylo usuzeno, o jakou vzdálenost ustoupilo čelo ledovce.

Během měření polygonů byly zaznamenávány i další doprovodné informace jako je výskyt jezer hrazených morénou. Ty se vyskytují u všech 14 ledovců kromě jediného ledovce Huandoy, kde lze ovšem usuzovat na výskyt několika malých lagun. Podobně u svahového ledovce Allicocha jsou jezírka jen velmi malá, zde to bude ale pravděpodobně způsobeno tím, že se společně s čelní morénou nachází na poměrně strmém svahu. Na vnitřním svahu studovaných čelních nebo bočních morén se nikde nevyskytuje viditelná vegetace. Jenom u několika málo vnějších svahů bočních či čelních morén bylo možné pozorovat vegetaci.

7.2.4 Extrapolace metody polygonového měření na ledovce bez datovaných morén

V dalším kroku byly nad satelitními snímky hledány morény s co nejpodobnějšími vlastnostmi, jaké byly pozorovány u morén datovaných. Jednalo se zejména o nadmořskou výšku morény, absenci vegetace na vnitřní straně morény, přibližně stejnou vzdálenost morény od současné pozice čela ledovce nebo přítomnost jezera hrazeného morénou. Následně byly posuzovány charakteristiky ledovce, ke kterému se vztahovala příslušná moréna. Šlo především o typ ledovce, orientaci vůči světovým stranám, nadmořskou výšku čela ledovce a další. Snahou též bylo, aby se ledovce nacházely napříč celým pohořím stejně jako ledovce s datovanými morénami. Všechny vybrané ledovce se nacházely na stejných 7 satelitních snímcích, nad kterými byly měřeny i ledovce z předešlého souboru.

V konečném důsledku bylo vybráno 9 ledovců v pohoří Cordillera Blanca, u kterých nebyla nalezena žádná studie vztahující se k Malé době ledové, jejich morény tedy nebyly datovány, ale svými vlastnostmi odpovídaly morénám datovaným, které byly pozorovány u

předešlého souboru ledovců. Snahou bylo, aby soubor vybraných ledovců typově zhruba odpovídal souboru 14 předešlých zkoumaných ledovců a soubory mohly být následně statisticky porovnávány. V souboru se tedy nachází údolní ledovce větších i menších rozměrů, svahové ledovce i ledovce malých rozměrů, které jsou na velmi rychlém ústupu. Vybrané ledovce jsou orientovány na různé světové strany stejně jako ledovce v předešlém souboru. Pro ledovce nebylo možné zjistit jejich oficiální názvy, jsou tedy nazvány dle vrcholu, pod kterým se nachází, případně jsou konkretizovány orientací svahu.

Výsledkem je tedy soubor 9 ledovců, na které byla extrapolována metoda polygonového měření. Výsledky pro oba soubory byly následně porovnány. Podrobnější informace o vybraných ledovcích lze najít v Příloze 1.

8 Výsledky vlastní analýzy vybraných ledovců

Podrobné výsledky analýzy vybraných ledovců pro jednotlivé ledovce lze nalézt v tabulce v Příloze 1. Přílohy 2 a 3 jsou pak katalogy všech zkoumaných ledovců, nejprve s datovanými a následně s nedatovanými morény. Záznam v katalogu obsahuje výřez ledovce ze satelitního snímku s vyznačenými hranicemi během maxima Malé doby ledové a v současnosti a informacemi o daném ledovci. Všechny zkoumané ledovce zaujímají plochu 45,31 km² a během maxima Malé doby ledové zaujímaly plochu 74,83 km². Následuje popis a porovnání výsledků pro ledovce s datovanými a nedatovanými morény.

8.1 Úbytek plochy ledovců

U souboru ledovců s datovanými morény byla pozorována ztráta plochy 19,07 km², tedy zmenšení ze 46,18 km² na současných 27,11 km². Jedná se o úbytek 41,29 % rozlohy. Průměrná plocha měřených ledovců během maxima Malé doby ledové byla 3,3 km², v současnosti je 1,94 km². Průměrná ztráta rozlohy ledovce je 1,36 km², což dělá 48,25 % původní plochy. Úbytek plochy ledovců se pohybuje od 23,63 % do 83,11 % původní rozlohy. Pearsonův korelační koeficient pro rozlohu během maxima Malé doby ledové a procentuální ztrátu od Malé doby ledové dodnes vyšel -0,65, pro současnou rozlohu a procentuální ztrátu dokonce -0,76. Tyto poměrně silné závislosti jasně naznačují, že nejmenší procentuální ztráta plochy ledovce se děje u ledovců, které byly během Malé doby ledové největší, zatímco menší ledovce ztratily větší procento rozlohy. Dále lze soudit, že větší ledovce reagují na změnu klimatu s větším zpožděním a ještě neprodělaly tak velkou ztrátu, jako ledovce malé, které reagují na změnu klimatu velmi rychle a ztratily již významnou část své rozlohy a hrozí jim, že v blízké budoucnosti roztají úplně.

U souboru ledovců bez datovaných morén byla ztráta rozlohy vyčíslena na 10,45 km², tedy úbytek z původních 28,65 km² na současných 18,2 km². Procentuálně se jedná o úbytek 36,47 % původní rozlohy. Průměrná rozloha měřených ledovců byla během maxima Malé doby ledové 3,18 km² a v současnosti je 2,02 km². Průměrná ztráta plochy ledovce je 1,16 km², což činí 51,18 % původní rozlohy. Úbytek plochy ledovců se pohybuje mezi hodnotami 24,29 % a 81,03 %. Pearsonův korelační koeficient pro rozlohu během maxima Malé doby ledové a procentuální ztrátu od Malé doby ledové dodnes vyšel -0,89, pro současnou rozlohu

a procentuální ztrátu taktéž -0,89, což značí velmi silné závislosti a ještě lépe potvrzuje závěry o ztrátě plochy ledovce závislé na velikosti ledovce popsané výše.

Celková změřená plocha všech zkoumaných ledovců během maxima Malé doby ledové tedy byla 74,83 km², v současnosti činí 45,31 km², což činí ztrátu 39,45 % původní rozlohy. Jednotlivé parametry úbytku rozlohy ledovců pro oba zkoumané soubory, tedy ledovce s datovanými a bez datovaných morén, lze porovnat taktéž v tabulce 7, Pearsonův korelační koeficient porovnávací matice těchto parametrů vychází 0,99. Značí tedy velmi silnou korelaci, z které lze předpokládat, že ledovce pro extrapolaci byly vybrány správně a výsledky měření na ledovcích s datovanými a nedatovanými morény se shodují, tedy extrapolace této metody byla úspěšná.

Parametr úbytku rozlohy ledovce	Soubor ledovců s datovanými morény	Soubor ledovců s nedatovanými morény
Minimální úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	23,63%	24,29%
Maximální úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	83,11%	81,03%
Celkový úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	41,29%	36,47%
Průměrný úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	48,25%	51,18%
Průměrná rozloha během maxima LIA [km ²]	3,30	3,18
Průměrná současná rozloha [km ²]	1,94	2,02
Průměrný úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	1,36	1,16

Tabulka 7. Parametry úbytku rozlohy ledovců pro jednotlivé soubory ledovců

8.2 Rychlost úbytku plochy ledovců

Pro ledovce s datovanými morény je známá i jejich rozloha v roce 1989, tak jak byla v daném roce spočítána pro databázi ledovců na území Peru. Lze tedy porovnat úbytek rozlohy zkoumaných ledovců mezi maximem Malé doby ledové a současností a mezi rokem 1989 a současností. Úbytek plochy mezi maximem Malé doby ledové a současností se pro jednotlivé ledovce pohybuje mezi 23,63 % a 83,11 %, pro období mezi rokem 1989 a současností je to od 4,19 % do 81,48 %. Celkový úbytek mezi rokem 1989 a současností je

22,14 %, zatímco pro období od maxima Malé doby ledové do současnosti 41,29 %. Průměrný úbytek je 31,04 % a 48,25 % pro období ve stejném pořadí. Nejrychleji na přelomu tisíciletí ztrácely plochu malé ledovce, zatímco ty větší ztrácely rozlohu mnohem pomaleji, rozdíl se pohybovaly v řádu desítek procent. Z uvedených hodnot je zřejmé, že rychlost tání sledovaných ledovců se v posledních dekádách neustále zrychluje. Zatímco za období dlouhé několik stovek let ztratily měřené ledovce v průměru 48,25 % plochy, za posledních 26 let ztratily 31,04 % své rozlohy, je tedy vidět, že vzhledem k rozdílné délce zkoumaných období se jedná o výrazně rychlejší ztrátu.

8.3 Výškový ústup čela ledovce

U souboru ledovců s datovanými morény se nadmořská výška čela ledovce během maxima Malé doby ledové pohybovala mezi hodnotami 4211 – 4802 m n. m., průměrně 4500 m n. m. V současnosti se u těchto ledovců čelo nachází ve výškách mezi 4355 – 4998 m n. m., průměrně 4760 m n. m. To znamená průměrný ústup čela ledovce o 260 metrů výše od Malé doby ledové. Výškový ústup čela ledovce se pohybuje od hodnoty 49 metrů po 496 metrů. Nelze říci, že by výškový ústup čela ledovců prokazatelně závisel na velikosti ledovce, velikosti úbytku jeho plochy nebo jeho nadmořské výšce.

U souboru ledovců bez datovaných morén se nadmořská výška čela ledovce během maxima Malé doby ledové pohybovala mezi 4339 – 4904 m n. m., průměrně 4601 m n. m. V současnosti se hodnoty pohybují mezi 4544 – 5178 m n. m., průměrně 4818 m n. m. Průměrný výškový ústup čela ledovce byl 217 metrů. Pro jednotlivé ledovce se výškový ústup čela ledovce pohyboval mezi 26 a 490 metry. U údolních ledovců s velkou rozlohou, konkrétně u Palcaraju, Palcacocha a Copa došlo k nejmenšímu výškovému ústupu.

Pro extrapolaci tedy byly vybrány ledovce, jejichž čela se nacházely a nacházejí o něco výše než u ledovců s datovanými morény. Průměrné hodnoty výškového ústupu čela ledovce se liší o 43 metrů, hodnoty pro jednotlivé ledovce se pohybují podobně od několika desítek metrů po 500 metrů. Lze tedy říci, že v tomto ohledu se ledovce s datovanými a nedatovanými morény poměrně dobře shodují. Průměrný výškový ústup čela ledovce pro všechny ledovce je 243 metrů.

8.4 Vzdálenost ústupu čela ledovce

U souboru ledovců s datovanými morény ustoupilo čelo ledovce od maxima Malé doby ledové do dnešního dne od 527 do 2476 metrů. Průměrně čelo ledovce ustoupilo o 1328 metrů zpět, medián vyšel 1386 metrů. Nejmenší vzdálenost byla pozorována u svahových ledovců, jen mírně nad 500 metrů. Při porovnání vzdálenosti ústupu čela ledovce s výškou čela ledovce během maxima Malé doby ledové vyšel Pearsonův korelační koeficient $-0,72$, což značí silnou závislost. Z toho lze soudit, že největší ústup čela ledovce proběhl u těch ledovců, jejichž čela se během Malé doby ledové nacházela nejnižší.

U souboru ledovců bez datovaných morén čelo ledovce ustoupilo o vzdálenost mezi hodnotami 489 a 2048 metrů. Průměrně čelo ledovce ustoupilo o 1281 metrů, medián vyšel 1292 metrů. Nejkratší vzdálenost ústupu byla opět pozorována u svahových ledovců okolo 500 metrů. Pearsonův korelační koeficient pro vzdálenost ústupu čela ledovce a výšku čela ledovce během Malé doby ledové vyšel $-0,66$, což značí stále poměrně silnou korelaci, i zde lze tedy soudit stejný závěr jako u předchozího souboru.

Oba soubory se prakticky ve všech pozorovaných parametrech vzdálenosti ústupu čela ledovce velmi dobře shodují a dohromady naznačují stejné závislosti. Čela svahových ledovců ustupují o nejkratší vzdálenost a nejvíce ustoupily ledovce, jejichž čela byla během maxima Malé doby ledové nejnižší. Průměrná vzdálenost ústupu čela ledovce je pro všechny ledovce 1309 metrů.

8.5 Úbytek podle typu ledovce

Ze všech 23 měřených ledovců je 5 ledovců typu svahového a zbylých 18 ledovců je typu údolního, přičemž je brán ohled především na to, jakého typu byl daný ledovec během maxima Malé doby ledové. Rozloha souboru svahových ledovců byla během maxima Malé doby ledové $6,89 \text{ km}^2$, v současnosti činí $3,2 \text{ km}^2$. Hodnoty pro soubor údolních ledovců pro období ve stejném pořadí jsou $67,94 \text{ km}^2$ a $42,11 \text{ km}^2$. Úbytek plochy svahových ledovců od maxima Malé doby ledové do současnosti činí $3,69 \text{ km}^2$, tedy $53,56 \%$, pro údolní ledovce je to $25,83 \text{ km}^2$, tedy $38,02 \%$. Čelo svahových ledovců ustoupilo v průměru o 595,2 metrů, u údolních ledovců v průměru o 1507,7 metrů. Výškový ústup čel svahových ledovců v průměru činil 262,6 metrů, u údolních ledovců 237,6 metrů. Hodnoty lze přehledně

porovnat v tabulce 8. Ze zjištěných hodnot jasně vyplývá, že svahové ledovce oproti ledovcům údolním ztratily od Malé doby ledové o něco větší část své rozlohy, jejich čelo však ustoupilo v průměru téměř jen o třetinovou vzdálenost a výškový ústup čela byl o trochu vyšší, než u údolních ledovců.

Typ ledovce	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výškový ústup čela ledovce [m]
Svahový	6,89	3,2	3,69	53,56%	595,2	262,6
Údolní	67,94	42,11	25,83	38,02%	1507,7	237,6

Tabulka 8. Vybrané parametry ústupu ledovců od Malé doby ledové pro svahové a údolní ledovce

9 Diskuze

Výsledky vlastní analýzy ústupu vybraných ledovců lze nejlépe diskutovat s výsledky výzkumu, který byl prováděn nad satelitními snímky z roku 2010 (Burns a kol., 2013), viz kap. 6.4, neboť jsou si tyto dvě analýzy časově nejbližší, ale pro porovnání byly použity i výsledky výzkumu z roku 2003 (Racoviteanu a kol., 2008). Ve vlastní analýze byly ledovce zkoumány nad snímky z let 2013 – 2016, celková zkoumaná zaledněná plocha byla 45,31 km², z toho 64,33 % zkoumané plochy bylo studováno nad snímky z roku 2013, 21,45 % nad snímky z roku 2015 a zbytek nad snímky z let 2014 a 2016. Pro účely diskuze bude tedy pro vlastní analýzu současnost chápána jako rok 2013, z kterého pochází největší analyzovaná rozloha.

9.1 Srovnání výsledků analýzy s jinými studii

Odhadovaná celková rozloha zalednění v pohoří Cordillera Blanca během maxima Malé doby ledové je 850 – 900 km². Odhad je především syntézou závěrů ze zkoumání historických snímků a záznamů, ze záznamů pocházejících z 30. let 20. století, z prvních leteckých snímků pohoří a dalších zdrojů (Georges, 2004). Zjištěná rozloha v roce 2010 byla 482,4 km² (Burns a kol., 2013), přičemž během let 2004 – 2010 činila roční ztráta zalednění 2,5 % rozlohy z roku 2004, což je asi 14,25 km² ročně. Pokud by se rychlost neměnila, znamenalo by to dle tohoto výzkumu, že velikost zaledněné plochy v roce 2013 byla 439,7 km². Pokud by se uvažovala střední hodnota odhadovaného zalednění během maxima Malé doby ledové, tedy 875 km², a rozloha v roce 2013 439,7 km², tvořila by ztráta plochy zalednění pro celé pohoří Cordillera Blanca za zkoumané období od maxima Malé doby ledové dodnes 435,3 km², neboli 49,75 %. Pro spodní hranici odhadu zalednění v Malé době ledové 850 km² by byla ztráta 410,3 km², tedy 48,27 %. Vlastní analýza zjistila ztrátu 39,45 % rozlohy od Malé doby ledové. To je poměrně kvalitní výsledek v porovnání se ztrátou zjištěnou pro celé pohoří, pokud se vezme v potaz, že analýza zkoumala pouze 10,3 % současného zalednění pohoří Cordillera Blanca. Výsledky se od sebe liší jen o 10,3 %, respektive 8,82 % pro spodní odhad zalednění během maxima Malé doby ledové.

Dále lze porovnat minimální, maximální a průměrnou současnou výšku čela ledovce. Výzkum z roku 2008 zjistil minimální nadmořskou výšku čela ledovce 4204 m n. m. (Racoviteanu a kol., 2008), ve vlastní analýze byla zjištěna nejnižší nadmořská výška 4355 m

n. m. Pro maximální nadmořskou výšku je hodnota z roku 2003 5369 m n. m., pro vlastní analýzu 5178 m n. m. Průměrná výška čela ledovce v roce 2003 byla 4881 m n. m. ve vlastní analýze pro rok 2013 4783 m n. m. Je vidět, že všechny hodnoty se poměrně dobře shodují, odchylují se jen o 100 – 200 metrů, což opět vzhledem k tomu, že vlastní analýza prozkoumala jen asi 10,3 % současného zalednění, je možné brát jako vcelku úspěšně provedenou část analýzy.

Nakonec lze ještě přibližně porovnat vzdálenost ústupu čela ledovce. Během 20. století různí autoři u různých ledovců pozorovali různě velkou vzdálenost ústupu čela ledovců (Ames, 1998; Jomelli a kol., 2007), vesměs lze jejich poznatky shrnout tak, že dle typu, velikosti a polohy ledovce, ustoupilo čelo ledovce během 20. Století v pohoří Cordillera Blanca o 500 – 1200 metrů. Podobně velký ústup je předpokládán i od maxima Malé doby ledové do počátku 20. Století, viz kap. 6.5. Tato zjištění lze tedy zhruba shrnout tak, že čela ledovců v pohoří Cordillera Blanca od maxima Malé doby ledové dodnes ustoupily o vzdálenost v rozmezí 1000 – 2000 metrů. Ve vlastní analýze vyšla průměrná vzdálenost ústupu čela ledovce 1309 metrů, což poměrně dobře odpovídá zjištěnému intervalu z předchozích studií.

Parametr	Jiné studie	Vlastní analýza
Zkoumaná plocha během LIA [km ²]	875	74,83
Zkoumaná plocha v současnosti [km ²]	439,7	45,31
Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	49,75%	39,45%
Minimální výška čela ledovce v současnosti [m n. m.]	4204	4355
Maximální výška čela ledovce v současnosti [m n. m.]	5369	5178
Průměrná výška čela ledovce v současnosti [m n. m.]	4881	4783

Tabulka 9. Parametry zkoumaného současného zalednění z jiných studií pro celé pohoří a z vlastní analýzy

V tabulce 9 lze porovnat výše zmíněné parametry současného zkoumaného zalednění, tak jak vyšly v jiných studiích a tak jak vyšly ve vlastní analýze. Pearsonův korelační koeficient pro matici parametrů jiných studií a pro matici parametrů vlastní analýzy vyšel 0,99, což značí velmi silnou korelaci dat. Podle tohoto koeficientu a hlavně podle podrobného porovnání jednotlivých parametrů analýzy, které je popsáno výše, lze soudit, že vlastní analýza ústupu zalednění v pohoří Cordillera Blanca od Malé doby ledové byla úspěšná a použitá a

představená metoda je funkčním nástrojem, kterým lze studovat ústup zalednění v pohoří Cordillera Blanca.

9.2 Potenciální chyby v průběhu analýzy

Dle dosažených výsledků lze sice tvrdit, že analýza ústupu ledovců byla úspěšná a použitá metoda funguje správně, ale je nutné počítat s tím, že výsledky mohou být a zcela určitě i jsou zatíženy určitými chybami. Byla sice vynaložena maximální snaha tyto chyby eliminovat především postupy popsány výše v kapitole 7 Metodika práce, nicméně nikdy se jim nelze vyhnout zcela.

Prvním bodem v postupu práce, kde mohla nastat chyba, je výběr správného software, v kterém byly satelitní snímky analyzovány. Byl zvolen program Google Earth Pro, který sice poskytuje velmi kvalitní satelitní snímky zdarma veřejnosti a dnes již obsahuje mnoho užitečných a kvalitně zpracovaných pracovních nástrojů, stále se ale nejedná o plně specializovaný odborný software určený výhradně k vědeckému zpracování satelitních snímků. Přesnost použitého nástroje pro měření plochy polygonů byla kontrolována vlastním kontrolním měřením, viz kap. 7.2.3.2 a vyšly velmi malé odchylky od odborného programu ArcMap 10.2. Z tohoto hlediska lze tedy použitý software považovat za poměrně přesný, i když lze přepokládat určité mírné zhoršení výsledků pro oblasti se složitou topografií.

Dalším aspektem programu Google Earth Pro, který svojí nepřesností mohl ovlivnit výsledky je softwarem používány digitální model reliéfu. Vzhledem k tomu, že se o použitém digitálním modelu reliéfu shání informace jen velmi obtížně a že tato funkce byla využita pouze pro korekturu již vytyčených hranic a k odhadu doplňujících parametrů ústupu ledovců, jako je nadmořská výška čela ledovce, nebyl model digitálního reliéfu podroben vlastnímu testování. Předpokládá se však, že obzvláště v zájmové vysokohorské oblasti se složitou topografií není tento model příliš přesný a výsledky, které jsou z něho odvezeny, musí být tedy brány s rezervou. Jedná se tedy především o výsledky nadmořské výšky čel ledovců.

V neposlední řadě mohou být výsledky postihnuty nepřesností způsobenou chybným záznamem satelitního snímku nebo jeho chybným zpracováním. Z toho důvodu jsou v kapitole 7.2.2.1 popsány postupy, jak s daty nakládají jejich poskytovatelé a následně firma

Google, alespoň do té míry, do jaké lze tyto informace dohledat. V kapitole 7.2.2.2 je následně přesnost georeferencování satelitních snímků z programu Google Earth Pro porovnávána s přesností georeferencovaných snímků v mapové službě World Imagery dostupné přes program ArcGis. Výsledné hodnoty odchylek vyšly malé a naznačují, že firma Google satelitní snímky georeferencuje velmi přesně, i když bylo opět pozorováno mírné zhoršení ve složitém topografickém terénu pohoří Cordillera Blanca. Zde je tedy potenciální chyba malá.

Největší potenciální chyba tedy hrozí ze špatně lokalizovaných morén datovaných do maxima Malé doby ledové. Jednak je tento bod analýzy zatížen všemi možnými chybami, které mohly nastat při lichenometrickém datování morén, tedy jako špatně změřené průměry stélek lišejníku, špatně sestavená křivka růstu, špatně datované morény a další. Tyto chyby nelze již eliminovat, neboť již mohou být zaneseny v dané studii. Chybu, kterou již zmírnit lze a bylo tak i snahou, je co nejpřesnější lokalizace správné morény na satelitním snímku. Jde jednak o nalezení správné morény, jednak o následné co nejpřesnější vedení hranice po hřbetu dané morény. Podrobný postup identifikace správných morén je popsán v kapitole 7.2.3.3.

Druhou největší potenciální chybou je chybné vytyčení hranic současného ledovce a zalednění v době maxima Malé doby ledové. Postup vytyčení hranic ledovce a s tím spojené problémy jsou podrobně popsány v kapitole 7.2.3.4, pravidla, podle kterých byl ledovec vytyčován, lze najít v kapitole 3.6. Zde hrozilo vytvoření velkého množství chyb, kvůli mnoha složitým situacím, které při vytyčování hranic ledovce vyvstanou, a zcela určitě se nepodařilo eliminovat všechny.

V neposlední řadě mohlo dojít také k vytvoření chyby při výběru ledovců, na které byla metoda extrapolována, byť byla vyvinuta maximální snaha vytvořit soubor ledovců, kde budou zastoupeny jednotlivé vlastnosti ledovců podobně, jako v prvním studovaném souboru.

Je vidět, že v dlouhém procesu analýzy ústupu zalednění na vybraných ledovcích existuje mnoho bodů, kde lze udělat chybu. V některých z nich zcela určitě k vytvoření chyby došlo, nicméně je velmi obtížné tuto chybu vyčíslit. Je proto nutné mít na paměti tyto potenciální chyby při interpretaci výsledků analýzy.

9.3 Návrhy pro budoucí využití metody

Metoda i přes určité zatížení chybami fungovala dobře a je možné ji v budoucnu upravit a vylepšit a využít k mapování ústupu ledovců v pohoří Cordillera Blanca znovu, nebo se ji pokusit aplikovat i v jiném pohoří. Pro možné budoucí využití této metody je třeba stanovit několik doporučení, aby metoda fungovala lépe.

Pokud mají mít výsledky větší váhu, je vhodné příště k analýze využít jiný software, nejlépe některý program specializovaný na dálkový průzkum Země. Pro analýzu výškového ústupu se stále nejvíce hodí měření v terénu, pokud je cílem získat opravdu přesná data. Nejdůležitějším aspektem je, si před začátkem samotné analýzy obstarat co nejpřesnější informace o konkrétním lichenometrickém měření a co nejdetailnější popis polohy daných datovaných morén a dalších tvarů reliéfu. Čím kvalitnější tyto data jsou, tím lépe lze následně morény lokalizovat na satelitních snímcích a tím kvalitnější výstupy budou následně z provedené analýzy vycházet. Další otázkou je, zda během analýzy použít automatickou klasifikaci tělesa ledovce, nebo hranici ledovce vytyčit manuálně. Při manuálním vytyčení je nutné se striktně držet stanovených pravidel a vytyčit hranici co nejdetailněji i za cenu vysoké časové náročnosti.

Při dodržení a vylepšení těchto opatření lze následně touto metodou získat poměrně dobré výsledky a představu a probíhající ústupu zalednění.

10 Závěr

Malá doba ledová byla v různých částech světa různě intenzivní a v každém regionu se objevila v jiný čas. Hlavním důsledkem ochlazení byl významný nárůst ledovců. Velmi výrazně se projevila Malá doba ledová v Evropě, kde byl i velmi podrobně zaznamenán její průběh a rozsah, který lze dnes interpretovat z historických písemností, obrazů a měření. V Evropě nejdelším výrazně chladnějším obdobím byla perioda mezi lety 1550 – 1750 a nejchladněji bylo mezi roky 1830 – 1860. Mezi lety 1400 – 1900 bylo v Evropě chladněji o 0,8 °C než na konci 20. století.

Pro ostatní regiony již neexistují zdaleka tak podrobné záznamy o Malé době ledové a tak se k získání informací o tomto období využívá různých nepřímých metod, nejčastěji však dendrochronologie a lichenometrie. V Severní Americe bylo chladné období na začátku 17. století a nejchladněji bylo až na počátku 19. století. Ve východní Číně bylo ochlazení mnohem méně výrazné, nejchladněji bylo v polovině 17. století okolo roku 1650. Pro jižní polokouli existuje jen málo informací o Malé době ledové. Patagonské ledovce dosáhly svého maxima mezi lety 1600 – 1700. V tropických Andách a především v pohoří Cordillera Blanca bylo podle provedených lichenometrických studií maximum Malé doby ledové mezi roky 1590 – 1720, tento údaj byl následně ještě zpřesněn a maximum je udáváno okolo roku 1630 +/- 27. Tomuto nejsilnějšímu období předcházela jako v mnoha jiných regionech raná fáze Malé doby ledové, zde datována okolo roku 1330 +/- 29. Po maximum Malé doby ledové docházelo k postupnému ústupu zalednění, které bylo ještě několikrát přerušeno chladnějšími obdobími, z nichž nejvíce jich bylo mezi roky 1780 – 1880.

Lichenometrické datování je velmi užitečný nástroj, jak v oblastech, pro které chybí historické záznamy, zjistit přibližné období nárůstu a ústupu ledovců. Metodika tohoto datování se neustále vyvíjí a vylepšuje od jejího vzniku v 50. letech minulého století a obzvláště v posledních letech v kombinaci s pokročilou statistikou dává poměrně dost přesné výsledky za velmi nízkou cenu a za velmi krátký čas. Metoda spočívá v měření velikosti stélek lišejníku, nejčastěji druhu *Rhizocarpon geographicum*, následně je ze změřených velikostí odvozeno stáří lišejníku a tedy i stáří skalního podkladu, na kterém lišejník roste. V pohoří Cordillera Blanca je lichenometrie hojně využívána, protože zde prakticky chybí jakékoliv historické zdroje o zalednění.

V tropických Andách se nachází více než 99 % tropických ledovců, z nichž 72 % se nachází na území Peru a nejvíce zaledněné je zde právě pohoří Cordillera Blanca. Odhadovaný rozsah zalednění v tomto pohoří během maxima Malé doby ledové je 850 – 900 km², od té doby jsou zdejší ledovce na ústupu, který byl jen několikrát přerušen menšími nárůsty ledovcové hmoty nebo zastavením ústupu. Rychlost ústupu ledovců se významně stupňuje přibližně od 40. let minulého století a především v posledních dekádách ledovce ustupují skutečně velmi rychle. Je to způsobeno především tím, že zdejší relativně malé ledovce nejsou v rovnováze se současným místním klimatem. V roce 1970 byla stanovena rozloha zdejšího zalednění na 660 – 680 km², v roce 1990 už jen na 620 km² a na přelomu tisíciletí byl rozsah zalednění mírně pod 600 km². Pro rok 2003 činila rozloha zalednění pohoří Cordillera Blanca 516,6 km² a v roce 2010 už pouhých 482,4 km². Modelové studie vycházející z výše zmíněných hodnot naznačují, že by kolem roku 2080 mohly ledovce v mnoha povodích zcela zmizet. Tento pravděpodobně již nezvratný proces bude mít drastický vliv na vodní režim v postižených povodích, což bude mít nedozírné následky na zdejší ekonomiku, obyvatelstvo a místní ekosystémy, neboť zdejší ledovce jsou nejvýznamnějším zdrojem pitné a užitkové vody v dané oblasti.

Od maxima Malé doby ledové do současnosti došlo tedy v pohoří Cordillera Blanca přibližně ke ztrátě 49,75 % rozsahu zalednění. Čela zdejších ledovců ustoupila o vzdálenost 1000 – 2000 metrů. Nejvíce ustupují ledovce malých rozměrů, které reagují na změnu klimatu rychleji, než ledovce větší, u kterých lze pozorovat určité zpoždění. Všechny tyto závěry různých studií se shodují s provedenou vlastní analýzou ústupu zalednění vybraných ledovců.

Hlavním výsledkem vlastní analýzy je úspěšná extrapolace metody polygonového měření rozlohy ledovců nad satelitními snímky na ledovce bez datovaných morén. Tato metoda byla v pohoří Cordillera Blanca použita poprvé. Prohlášení vlastní analýzy za vcelku úspěšnou je založeno na poměrně dobré shodě jejích výsledků s výsledky jiných studií a na diskuzi o možných chybách v metodě. Samotné výsledky vlastní analýzy tvoří následně také zajímavé a velmi aktuální údaje o ústupu zalednění v pohoří Cordillera Blanca. Celkový procentuální úbytek zaledněné plochy za studované období v celém sledovaném souboru ledovců tvoří 39,45 %, oproti úbytku 49,75 % zalednění v celém pohoří udávaném a vypočteném v jiných studiích. Průměrný výškový ústup čela ledovce pro sledovaný soubor

vyšel 243 metrů a průměrná vzdálenost, o kterou čelo ledovce ustoupilo, byl 1309 metrů, což velmi dobře sedí do intervalu hodnot, které byly zjištěny v dalších studiích, tedy 1000 – 2000 metrů. Jak je již výše zmíněno i vlastní analýza potvrdila rychlejší ústup u ledovců menších rozměrů, než u větších. Vlastní analýza navíc ještě zjistila, že lze pozorovat rozdíl ve ztrátě rozsahu zalednění a vzdáleností ústupu čela ledovce mezi svahovými a údolními ledovci. Svahové ledovce ztratily větší část své rozlohy, ale jejich čelo ledovce ustoupilo o kratší vzdálenost. Tyto rozdíly ve způsobu a rychlosti ústupu ledovců svahových a údolních mohou být zajímavým námětem pro další výzkum.

K této analýze byla využita kombinace výsledků lichenometrické studie a dálkového průzkumu Země. Pomocí polygonového měření nad satelitními snímky byly zjištěny rozlohy ledovců současné a v době maxima Malé doby ledové. Vzhledem k poměrně dobré shodě výsledků analýzy s výsledky jiných studií, lze použitou metodu prohlásit za funkční a není špatné se zamyslet nad jejím vylepšením a dalším testováním a následným použitím i v jiných zaledněných oblastech.

Jisté tedy je, že i v pohoří Cordillera Blanca bylo zalednění silně ovlivněno Malou dobou ledovou a že v současnosti jsou zdejší ledovce na výrazném ústupu, který v budoucnu značně ovlivní místní obyvatelstvo a ekosystémy. Přesnější poznání dynamiky místních ledovců, může významně pomoci řešit potenciální problémy, které z ústupu ledovců vyplývají. Ukazuje se, že k tomuto poznání není úplně vždy zcela nutné studium v terénu, ale že velkou část výzkumu lze provádět i pomocí dálkového průzkumu Země.

11 Citovaná literatura

- Aguirre, Monti. 2013.** Marañón River. [Online]. [Citace: 14. 2 2016.]
<http://www.internationalrivers.org/campaigns/mara%C3%B1%C3%B3n-river>.
- Ames, A. 1998.** A documentation of glacier tongue variations and lake development in the Cordillera Blanca, Peru.
- Ames, A. 1989.** Glacier inventory of Peru, Part 1.
- Anderson, David. 2004.** Glacial and periglacial Environments.
- Armstrong, R. A. a Smith, S. N. 1987.** *Symbiosis*.
- Armstrong, R. A. 1983.** Growth Curve of the Lichen *Rhizocarpon Geographicum*. *New Phytologist*.
- Armstrong, R. A. 1984.** Growth of experimentally reconstructed thalli of the lichen *Parmelia Conspersa*. *New Phytologist*.
- Armstrong, R. A. 1974.** Growth phases in the life of a lichen thallus. *New Phytologist*.
- Armstrong, Richard. 2004.** Lichens, Lichenometry and Global warming. *Microbiologist*.
- Baraer, M. a kol. 2012.** Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of Glaciology*.
- Becek, K. 2011.** On the Positional Accuracy of the GoogleEarth Imagery. *Spatial Information Processing Paper*.
- Bentley, Charles a Thomas, Robert. 2007.** Global outlook of Ice and Snow, part Ice sheets.
- Beschel, R. E. 1950.** Flechten als altersmasstab Rezenten morainen. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*.
- Bonnot, D. 1984.** Neotectonique et tectonique active de la Cordillera Blanche et du Callejón de Huaylas, Andes Nord-Peruviennes.
- Borisenkov, Y. P. 1992.** Documentary evidence from U.S.S.R., Climate since A.D. 1500.
- Bradley, R. S. a Jones, P. D. 1993.** 'Little Ice Age' Summer Temperature Variations: their Nature and Relevance to Recent Global Warming Trends. *Holocene*.
- Briffa, K. R., Bartholin, T. S. a Eckstein, D. 1990.** A 1400-year tree-ring record of summer temperatures in Fennoscandia. *Nature*.
- Broggi, J. A. 1943.** La desglaciación actual de los Andes del Peru.
- Burns, P. a Nolin, A. 2014.** Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010.

- Burns, P. a Nolinne, A. 2013.** Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment* 140 (2014) 165–178.
- Bury, J. T. 2011.** Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru. *Climatic Change*.
- Cáceres, B. a kol. 2004.** Glaciares del Ecuador: Antizana y Carihuyarazo, balance de masa, topografía, meteorología a hidrológia.
- Calkin, P. E. a Ellis, J. M. 1980.** A lichenometric dating curve and its application to Holocene glacier studies in the central Brooks Range, Alaska. *Arctic and Alpine Research*.
- Clapperton, C. M. 1983.** The glaciations of the Andes. *Quaternary science reviews*.
- Cooley, D. a kol. 2006.** A Bayesian hierarchical extreme value model for lichenometry. *Environmetrics*.
- Denton, G. H. a Karlén, W. 1973.** Lichenometry: its application to Holocene moraine studies in Southern Alaska and Swedish Lapland. *Arctic and Alpine Research*.
- Durán-Alarcón, C. a kol. 2015.** Recent trends on glacier area retreat over the group of Nevados Caullaraju-Pastoruri (Cordillera Blanca, Peru) using Landsat imagery. *Journal of South American Earth Sciences*.
- Fishpool, I. 1996.** Glaciation and deglaciation: The Columbia icefield and Athabasca glacier.
- Georges, C. 2004.** 20th century glacier fluctuations in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Arct. Antarct. Alp. Res.*, 36(1), 100–107.
- Giovanni, Melissa, Horton, Brian a Garzione, Carmala. 2010.** Extensional basin evolution in the Cordillera Blanca, Peru: Stratigraphic and isotopic records of detachment faulting and orogenic collapse in the Andean hinterland.
- Grove, J. 1988.** The Little Ice Age.
- Hagg, W. a Braun, L. 2005.** The influence of glacier retreat on water yield from high mountain areas: comparison of Alps and central Asia.
- Hall, D. K. a Riggs, G. A. 2014.** Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers.
- Hall, D.K. 1995.** Development of methods for mapping global snow cover using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data. *Remote Sens. Environ.*, 54(2), 127–140.
- Hambrey, Michael J. a kol. 2009.** Sedimentological, geomorphological and dynamic context of debris-mantled glaciers, Mount Everest (Sagarmatha) region, Nepal.
- Harrison, S. a Winchester, V. 2000.** Nineteenth and twentieth century glacier fluctuations and climatic implications in the Arco and Colonia valleys Hiello Patagonico Norte, Chile. *Arctic Antarctic and Alpine Research Journal*.

- Hastenrath, S. 1981.** The Glaciation of the Ecuadorian Andes.
- Hastenrath, Stefan. 1999.** Satellite image atlas of glaciers of the world, part Glaciers of Peru. [Online] [Citace: 2015. 12 28.] <http://pubs.usgs.gov/pp/p1386i/peru/occident.html#STEFAN>.
- Holzhauser, Hanspeter a Funk-Salami, Françoise. 2011.** World of glaciers.
- Horník, Stanislav. 1986.** Fyzická geografie II. 1.
- Hubbard, Bryn a kol. 2005.** Impact of a rock avalanche on a moraine-dammed proglacial lake: Laguna Safuna Alta, Cordillera Blanca, Peru.
- Chábera, Stanislav a Horník, Stanislav. 1982.** Základy fyzické geografie. 1.
- Chacón, José. 2014.** Cordillera Blanca. [Online]. [Citace: 22. 12 2015.] <http://www.cordillerablanca.info/about-cordillerablanca.php>.
- Innes, J. L. 1985.** Lichenometry. *Progress in Physical Geography*.
- Iturrizaga, Lasafam. 2013.** Bent glacier tongues: A new look at Lliboutry's model of the evolution of the crooked Jatunraju Glacier (Paron Valley, Cordillera Blanca, Peru).
- Jomelli, V. a kol. 2007.** Assessment study of lichenometric methods for dating surfaces. *Geomorphology*.
- Jomelli, V. a kol. 2007.** Recalibration of the yellow Rhizocarpon growth curve in the Cordillera Blanca (Peru) and implications for LIA chronology. *Geomorphology*.
- Jones, P. D., Briffa, K. R. a Barnett, T. P. 1998.** High-resolution Palaeoclimatic Records for the Last Millennium: Interpretation, Integration and Comparison with General Circulation Model Control Run Temperatures. *Holocene*.
- Juen, I., Kaser, G. a Georges, C. 2007.** Modeling observed and future runoff from a glacierized tropical catchment (Cordillera Blanca, Perú). *Global Planet. Change* 59 (1–4), 37–48.
- Kargel, J. S. 2005.** Global Land Ice Measurements from Space.
- Kaser, G. a Georges, Ch. 1997.** Changes in the equilibrium line altitude in the tropical Cordillera Blanca (Peru) between 1930 and 1950 and their spatial variations. *Ann. Glaciol.* 24, 344–349.
- Kaser, G. a Osmaston, H. 2002.** Tropical glaciers. International Hydrological Series.
- Kaser, G. a kol. 2003.** The impact of glaciers on the runoff and the reconstruction of mass balance history from hydrological data in the tropical Cordillera Blanca, Peru. *Hydrol.* 288, 130–144.
- Kaser, G., Ames, A. a Zamora, M. 1990.** Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Peru. *Annals of Glaciology*.
- Kaser, Georg a Georges, Christian. 1997.** Changes of the equilibrium line altitude in the tropical Cordillera Blanca, Peru, 1930–50, and their spatial variations. *Annals of Glaciology* 24.
- Kim, Y. O. 1984.** The Little Ice Age in Korea: an approach to historical climatology.

Kinzi, H. 1942. Gletcherkundliche Begleitworte zur Karte der Cordillera Blanca, Peru.

Lambrecht, Astrid a kol. 2014. The evolution of Fedchenko glacier in the Pamir, Tajikistan, during the past eight decades. *Journal of Glaciology*.

Le Roy, L. 1971. Times of Feast, Times of Famine, a History of Climate Since the Year 1000.

Lemke, Matt. 2004. Cordillera Blanca Overview. [Online]. [Citace: 20. 2 2016.]
<http://www.summitpost.org/cordillera-blanca/152467>.

Locke, W. W., Andrews, J. T. a Webber, P. J. 1979. A manual for lichenometry. *British Geomorphology Research Group Technical Bulletin*.

Luckman, B. H. a Villalba, R. 2001. Assessing the synchronicity of glacier fluctuations in the Western Cordillera of the Americas during the last millennium.

Luckman, B. H. 2000. The Little Ice Age in the Canadian Rockies. *Geomorphology*.

Mann, M. a Bradley, R. S. 1999. Northern Hemisphere Temperatures during the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations.

Mann, Michael. 2002. Encyclopedia of Global Environmental Change: část Little Ice Age.

Mark, B. G. a McKenzie, J. M. 2007. Tracing increasing tropical Andean glacier melt with stable isotopes in water.

Mark, B. G. a Seltzer, G. O. 2003. Tropical glacier meltwater contribution to stream discharge: a case study in the Cordillera Blanca, Peru.

Masset, P. 2012. Lichenometry and the reconstruction of glacier dynamics in western Switzerland since the Little Ice Age (LIA). *Quaternary International*.

Matthes, F. 1939. Report of committee on Glaciers.

Matthews, J. A. 1974. Families of lichenometric dating curves from Storbreen Gletscher-vorfeld, Jotunheim, Norway. *Norsk Geografisk Tidsskrift*.

Mercer, J. H. a Palacios, M. O. 1977. Radiocarbon dating of the last glaciation in Peru. *Geology* 5.

Molnia, Bruce. 2005. Satellite image atlas of glaciers of the world, part Glaciers of Alaska.

Morales-Arno, B. 1999. Satellite image atlas of glaciers of the world, part Glaciers of Peru.

Nash, Thomas H. 1996. *Lichen Biology*.

Nesje, A. a Dahl, S. O. 2003. The Little Ice Age, only temperature? *The Holocene*.

Niedertscheider, J. 1990. Untersuchungen zur Hydrographie der Cordillera Blanca Peru.

Palacios, Arnaldo Tacci, Ortiz, Daniel Colonia a Judith Torres, Castillo. 2014. Inventario nacional de glaciers y lagunas.

Paraj, Zsolt. 2015. Zjišťování změn polohy ELA ledovců v pohoří Cordillera Blanca, Peru z dat DPZ.

Paterson, W.S.B. 1994. The Physics of Glaciers.

Paul, F. a kol. 2004. Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. *Geophys. Res. Lett.*

Paulo, Andrzej. 1980. Geology of Cordillera Blanca and source rocks for fine-grained material accumulated within Broggi glacier.

Pelto, M. 2010. Llaca glacier retreat, Peru.

Pfister, C. 1995. Monthly Temperature and Precipitation in Central Europe 1525–1979: Quantifying Documentary Evidence on Weather and its Effects.

Pidwirny, M. 2006. Fundamentals of Physical Geography - part Glacial Processes.

Planas, Xavier, Ponsa, Aurea a Coronato, Andrea. 2002. Geomorphological evidence of different glacial stages in the Martial cirque, Fuegian Andes, southernmost South America. *Quaternary International.*

Polissar, P. J. a kol. 2006. Solar modulation of Little Ice Age climate in the tropical Andes.

Porter, S. C. 1981. Lichenometric studies in the Cascade Range of Washington: establishments of *Rhizocarpon geographicus* curve.

Portocarrero Rodríguez, César A. 2014. The glacial lake handbook.

Potere, D. 2008. Horizontal Positional Accuracy of Google Earth's High Resolution Imagery Archive. *Sensors.*

Rabatel, A. a kol. 2005. Dating Little Ice Age in the Tropics from the moraines of Charquini glaciers (Andes of Bolivia, 16° S). *Géosciences.*

Rabatel, A., Francou, B. a Gomez, J. 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere.*

Rabatel, V. a kol. 2008. A chronology of the Little Ice Age in the tropical Andes of Bolivia and its implications for climate reconstruction. *Quaternary Research.*

Racoviteanu, Adina E. a kol. 2008. Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology, Vol. 54, No. 186.*

Ramirez, E. a kol. 2001. Small glaciers disappearing in the tropical Andes. A case study in Bolivia: Glaciar Chacaltaya.

Ramírez, Ricardo Villanueva. 2011. Características de la cuenca del Río Santa.

Rau, F. a kol. 2005. Illustrated GLIMS Glacier Classification Manual.

Raup, B. a Khalsa, S. J. S. 2010. GLIMS Analysis Tutorial.

Matthes, F. 1939. Report of Committee on Glaciers

Reynolds, J. M. 2003. Development of glacial hazard and risk minimisation protocols in rural environments.

Rodbell, D. T. 1992. Lichenometric and radiocarbon dating of Holocene glaciation, Cordillera Blanca, Peru. *Holocene 2*.

Röthlisberger, F. 1987. 10000 Jahre Gletschergeschichte der Erde.

Rozehnal, Jakub. 2015. Maunderovo minimum. [Online]. [Citace: 22. 12 2015.]
<http://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=209>.

Savoskul, O. S. 1999. Holocene Glacier advances in the headwaters of Sredniya Avacha, Kamchatka, Russia. *Quaternary Research*.

Serreze, M. 2005. GLIMS and National Snow and Ice Data Center.

Shumskiy, P. A. 1959. Density of glacier ice.

Schauwecker, S. a kol. 2014. Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Global and Planetary Change*.

Sievers, W. 1914. Reise in Peru und Equador, ausgeführt 1909.

Solomina, O. N., Muraviev, Y. D. a Bazanova, L. I. 1995. Little Ice Age glaciers in Kamchatka. *Annals of Glaciology*.

Solomina, O. a kol. 2007. Lichenometry in the Cordillera Blanca, Peru: "Little Ice Age" moraine chronology. *Global and Planetary Change 59*.

Solomina, Olga a Calkin, P. E. 2003. Lichenometry as Applied to Moraines in Alaska, U.S.A., and Kamchatka, Russia. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*.

Stahl, K. a Moore, D. 2006. Influence of watershed glacier coverage on summer streamflow in British Columbia, Canada.

Thompson, L.G. a kol. 1986. The little ice age as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya ice cap. *Science*.

Villalba, R., Leiva, J.C. a Rubulls, S. 1990. Climate, tree-rings, and glacial fluctuations in the Rio Frias Valley Rio Negro, Argentina. *Arctic, Antarctic and Alpine Research Journal*.

Vincent, C. a kol. 2005. Glacier fluctuations in the Alps and in the tropical Andes. *Geoscience*.

Vuille, M., Kaser, G. a Juen, I. 2008. Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. *Global and Planetary Change 62 (2008) 14–28*.

Webber, P. J. a Andrews, J. T. 1973. Lichenometry: A commentary. *Arctic and Alpine Research*.

Wiles, G. C. a Calkin, P. E. 1994. Late Holocene, high-resolution glacial chronologies and climate, Kenai Mountains, Alaska. *Geological Society of American Bulletin*.

Winchester, V. a Harrison, S. 2000. Dendrochronology and lichenometry: colonization, growth rates and dating of geomorphological events on the east side of the North Patagonian Icefield, Chile. *Geomorphology*.

Winchester, W. 1989. An evaluation of lichenometry: with field studies in Lappland, Britain and the Western Alps.

Wise, James M. a Noble, Donald C. 2003. Geomorphic evolution of the Cordillera Blanca, Northern Peru.

Zemp, Michael a Haeberli, Wilfried. 2007. Global outlook for ice and snow, part Glaciers and ice caps.

12 Seznam obrázků

Obrázek 1. Pohoří Cordillera Blanca, Peru s vybranými ledovci zmíněnými v práci	15
Obrázek 2. Odhad relativní změny teploty pro různé světové regiony v minulém tisíciletí (podle Mann, 2002)	30
Obrázek 3. Mapovník zeměpisný (<i>Rhizocarpon geographicum</i>) autor: Stanislav Krejčík	33
Obrázek 4. Křivka růstu pro druh <i>Rhizocarpon geographicum</i> , jihovýchodní Island (podle Armstrong, 2004)	36
Obrázek 5. Lichenometrická studie v pohoří Cordillera Blanca (podle Solomina a kol., 2007)	43
Obrázek 6. Křivky růstu z lichenometrické studie v pohoří Cordillera Blanca (podle Solomina a kol., 2007)	44
Obrázek 7. Výsledky lichenometrické studie v pohoří Cordillera Blanca (podle Solomina a kol., 2007)	46
Obrázek 8. Graf ústupu zalednění v pohoří Cordillera Blanca během 20. století	52
Obrázek 9. Testovací polygon Ještěd	62
Obrázek 10. Testovací polygon Sněžka	62
Obrázek 11. Historické snímky ledovce Broggi zaznamenávající jeho výrazný ústup během 20. století. Zleva (Kinzl 1932), (Braasch 1999), (Braasch 2014)	64

13 Seznam tabulek

Tabulka 1. Porovnání výsledků inventarizace ledovců pro rok 1970 a 2003 (podle Racoviteanu a kol., 2008)	50
Tabulka 2. Vývoj rozlohy zalednění v pohoří Cordillera Blanca	52
Tabulka 3. Parametry zaměřených bodů a jejich odchylka mezi programy ArcGis 10.2 a Google Earth Pro	59
Tabulka 4. Parametry satelitních snímků použitých při analýze	60
Tabulka 5. Parametry testovacího polygonu Ještěd	62
Tabulka 6. Parametry testovacího polygonu Sněžka	63
Tabulka 7. Parametry úbytku rozlohy ledovců pro jednotlivé soubory ledovců	68
Tabulka 8. Vybrané parametry ústupu ledovců od Malé doby ledové pro svahové a údolní ledovce	71
Tabulka 9. Parametry zkoumaného současného zalednění z jiných studií pro celé pohoří a z vlastní analýzy	73

14 Elektronické zdroje

Digital Globe [online], 2015 [citováno 2016-06-10], dostupné z URL: <https://www.digitalglobe.com/>

Airbus Defence and Space [online], 2015 [citováno 2016-06-05], dostupné z URL: <http://www.intelligence-airbusds.com/>

Digital Globe Image Metadata [databáze online], 2016 [citováno 2016-06-10], dostupné z URL: <https://browse.digitalglobe.com/imagefinder/filter.do>

Airbus Defence and Space Image Metadata [databáze online], 2016 [citováno 2016-06-09], dostupné z URL: <http://www.intelligence-airbusds.com/en/4871-browse-and-order>

ArcGis [online], 2016 [citováno 2016-06-11], dostupné z URL: <http://www.arcgis.com/features/>

15 Přílohy

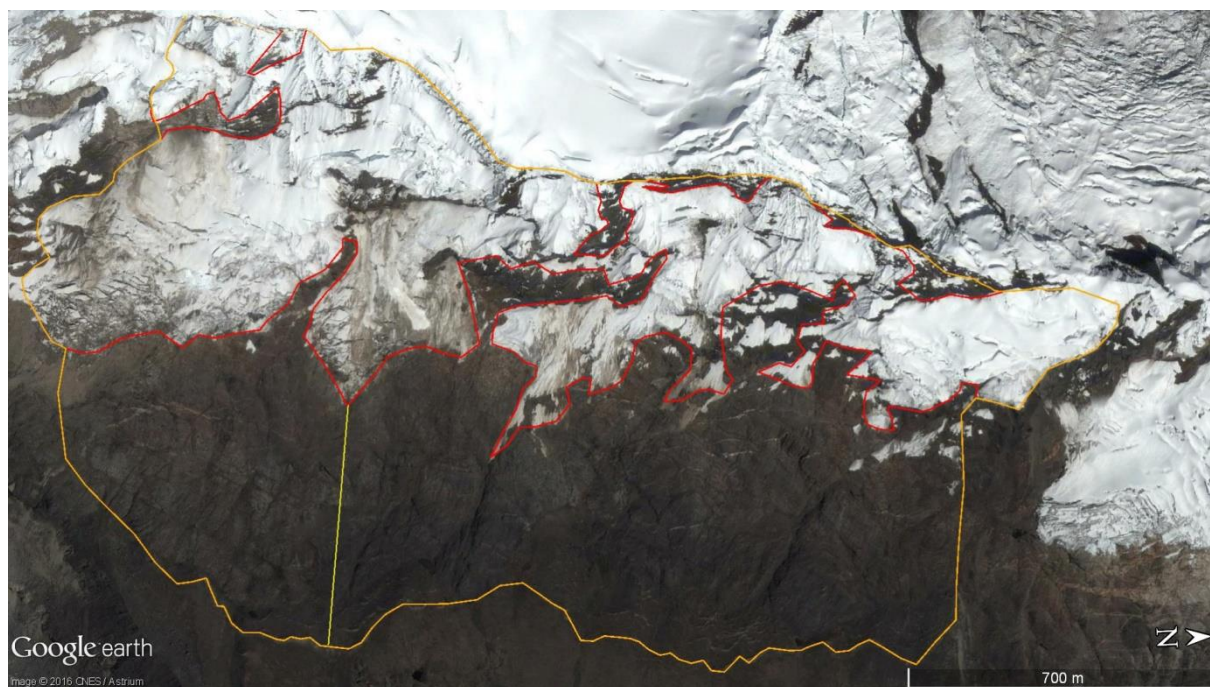
PŘÍLOHA 1													
Parametry ústupu ledovců od Malé doby ledové se známým lichenometrickým datováním morén													
Název ledovce	Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Rozloha v roce 1989 (Ames, 1989) [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy 1989 - současnost [km ²]	Úbytek plochy 1989 - současnost [%]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
Alliococha	svahový	20.8.2013	2,31	1,40	0,99	0,41	29,29%	1,32	57,14%	549	4707	4935	228
Artesonraju	údolní	21.6.2015	7,49	5,97	5,72	0,25	4,19%	1,77	23,63%	1542	4280	4742	462
Atlante	údolní	20.8.2013	1,24	0,97	0,64	0,33	34,02%	0,60	48,39%	1554	4413	4909	496
Broggi	údolní	20.8.2013	1,83	1,00	0,41	0,59	59,00%	1,42	77,60%	2124	4456	4939	483
Canchaha	údolní	20.8.2013	3,74	3,51	2,56	0,95	27,07%	1,18	31,55%	1574	4373	4690	317
Cancaraca 1	údolní	20.8.2013	1,91	1,48	1,1	0,38	25,68%	0,81	42,41%	1479	4616	4998	382
Cancaraca 2	údolní	20.8.2013	0,70	0,46	0,24	0,22	47,83%	0,46	65,71%	819	4621	4684	63
Huandoy	údolní	29.1.2014	3,14	2,71	1,77	0,94	34,69%	1,37	43,63%	2084	4534	4822	288
Checouiacraju	údolní	20.8.2013	3,93	2,29	1,95	0,34	14,85%	1,98	50,38%	1292	4375	4607	232
Liaca	údolní	20.8.2013	6,00	4,63	4,32	0,31	6,70%	1,68	28,00%	1018	4469	4518	49
Pisco	svahový	20.8.2013	2,36	2,21	1,64	0,57	25,79%	0,72	30,51%	527	4802	4970	168
Pucalljica Norte	údolní	21.6.2015	6,95	4,69	4	0,69	14,71%	2,95	42,45%	2476	4211	4355	144
Uruchraju	údolní	28.4.2016	3,10	2,15	1,52	0,63	29,30%	1,58	50,97%	651	4549	4700	151
Yanamarey	údolní	28.4.2016	1,48	1,35	0,25	1,10	81,48%	1,23	83,11%	899	4604	4778	174
Celkem	-	-	46,18	34,82	27,11	7,71	22,14%	19,07	41,29%	-	-	-	-
Průměr	-	-	3,30	2,49	1,94	0,55	31,04%	1,36	48,25%	1327,71	4500,71	4760,50	259,79
Medián	-	-	2,73	2,18	1,58	0,49	28,18%	1,35	46,01%	1385,50	4501,50	4760,00	230,00

Parametry ústupu ledovců od Malé doby ledové vybraných pro extrapolaci metody													
Název a orientace vrcholu/ledovce	Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]	Výškový ústup čela ledovce [m]	Parametry pro celý soubor vybraných ledovců	
Akilpo 1 - S svah	údolní	20.8.2013	1,85	0,62	1,23	66,49%	1852	4567	5026	459	459	Zkoumaná plocha během LIA [km ²]	74,83
Akilpo 2 - SZ svah	svahový	20.8.2013	0,74	0,28	0,46	62,16%	819	4645	5135	490	490	Zkoumaná plocha v současnosti [km ²]	45,31
Copa - SV svah	údolní	20.8.2013	3,65	2,4	1,25	34,25%	1704	4558	4632	74	74	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	39,45%
Chacaraju - Z svah	údolní	21.5.2016	3,89	2,72	1,17	30,08%	1609	4397	4614	217	217	Průměrná vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	1309,35
Paicacocho	údolní	20.8.2013	8,11	6,14	1,97	24,29%	2048	4587	4641	54	54	Průměrný výškový ústup čela ledovce [m]	243
Palcaraju - JZ svah	údolní	20.8.2013	6,38	4,58	1,8	28,21%	1122	4569	4995	26	26		
Pumapampa - J svah	svahový	29.1.2014	0,9	0,18	0,72	80,00%	592	4841	4994	153	153		
Ulla - Z svah	údolní	20.8.2013	2,55	1,17	1,38	54,12%	1292	4339	4544	205	205		
Vallunaraju - IV svah	svahový	20.8.2013	0,58	0,11	0,47	81,03%	489	4904	5178	274	274		
Celkem	-	-	28,65	18,2	10,45	36,47%	-	-	-	-	-		
Průměr	-	-	3,18	2,02	1,16	51,18%	1280,78	4600,78	4817,67	216,89	216,89		
Medián	-	-	2,55	1,17	1,23	54,12%	1292	4569	4641	205	205		

PŘÍLOHA 2

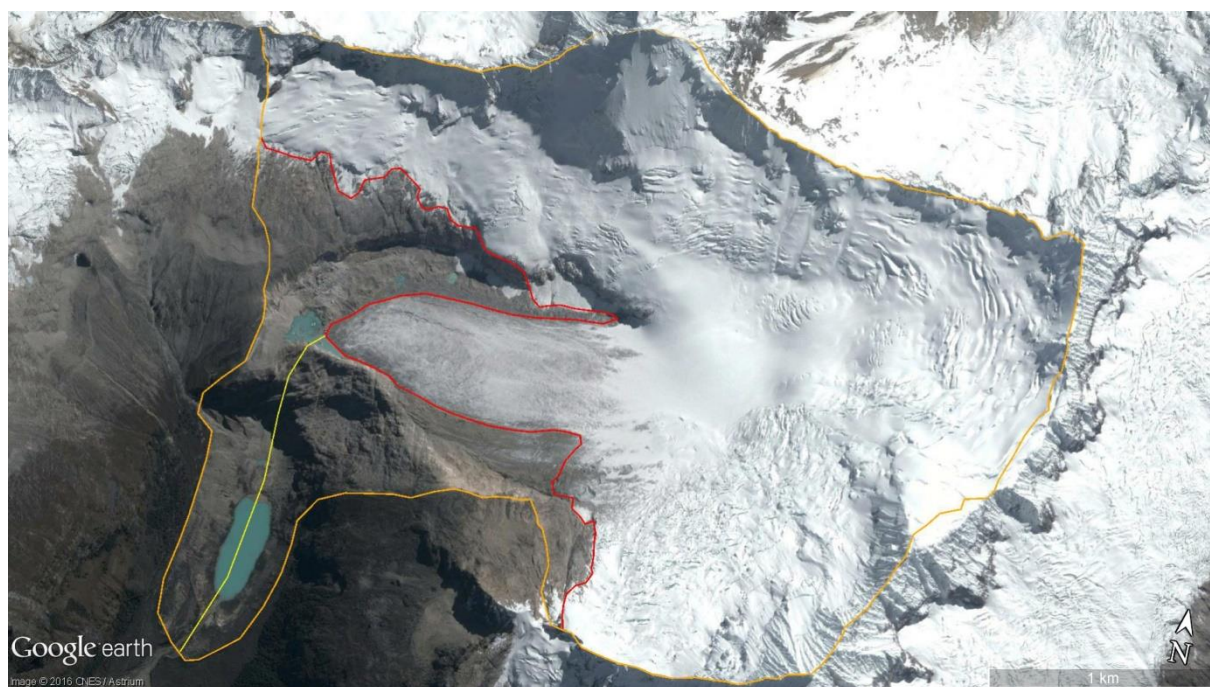
KATALOG ZKOUMANÝCH LEDOVCŮ S DATOVANÝMI MORÉNAMI

Allicocha **Souřadnice:** 9° 14' 43.02" j. š., 77° 28' 27.44" z. d.



Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
svahový	20.8.2013	2,31	0,99	1,32	57,14%	549	4707	4935	228

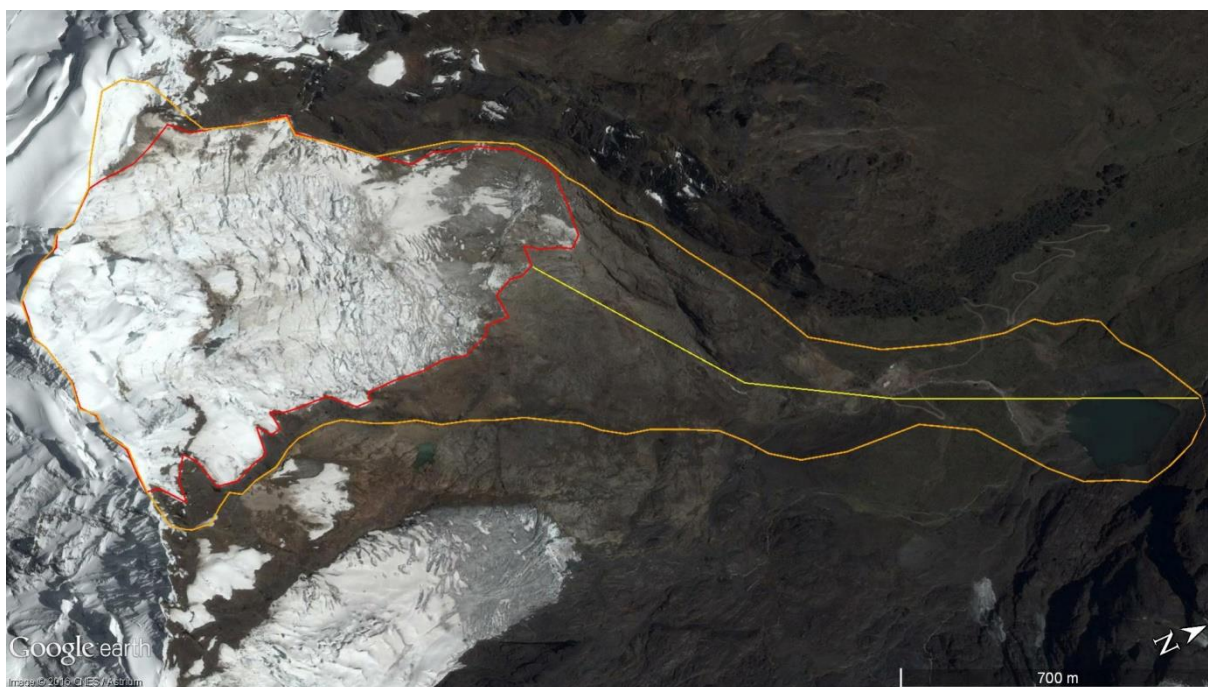
Artesonraju **Souřadnice:** 8° 57' 53.08" j. š., 77° 37' 39.39" z. d.



Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	21.6.2015	7,49	5,72	1,77	23,63%	1542	4280	4742	462

Atlante

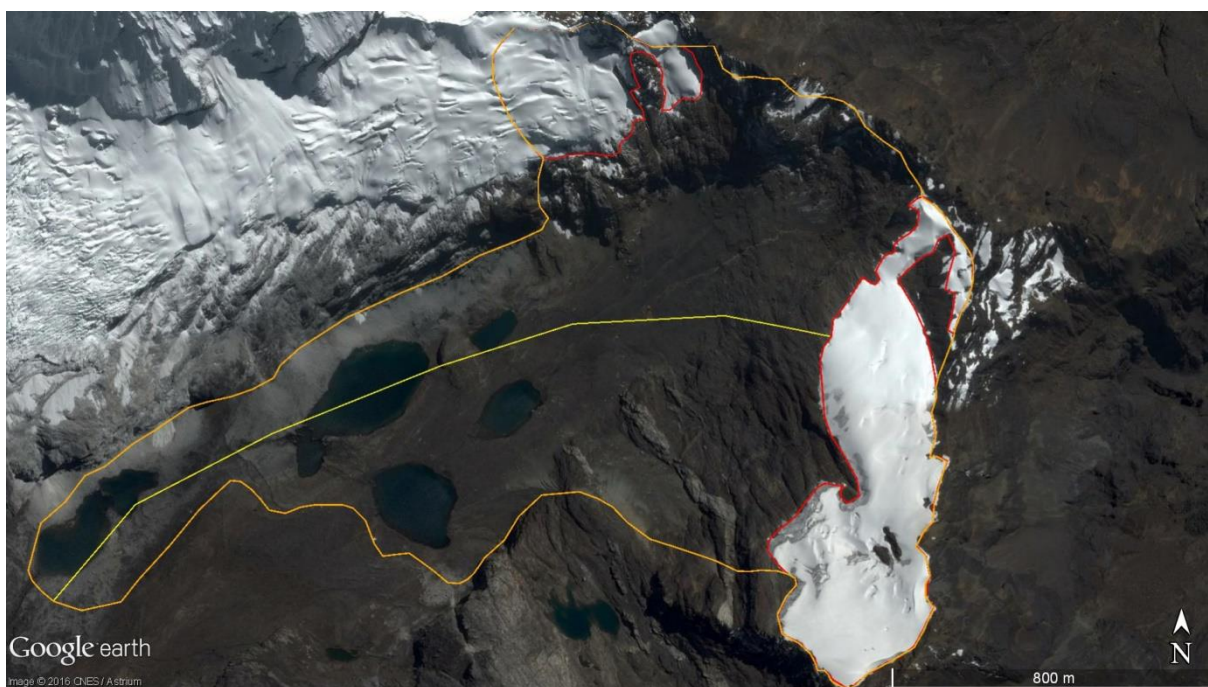
Souřadnice: 9° 16' 14.14" j. š., 77° 25' 50.40" z. d.



Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	20.8.2013	1,24	0,64	0,60	48,39%	1554	4413	4909	496

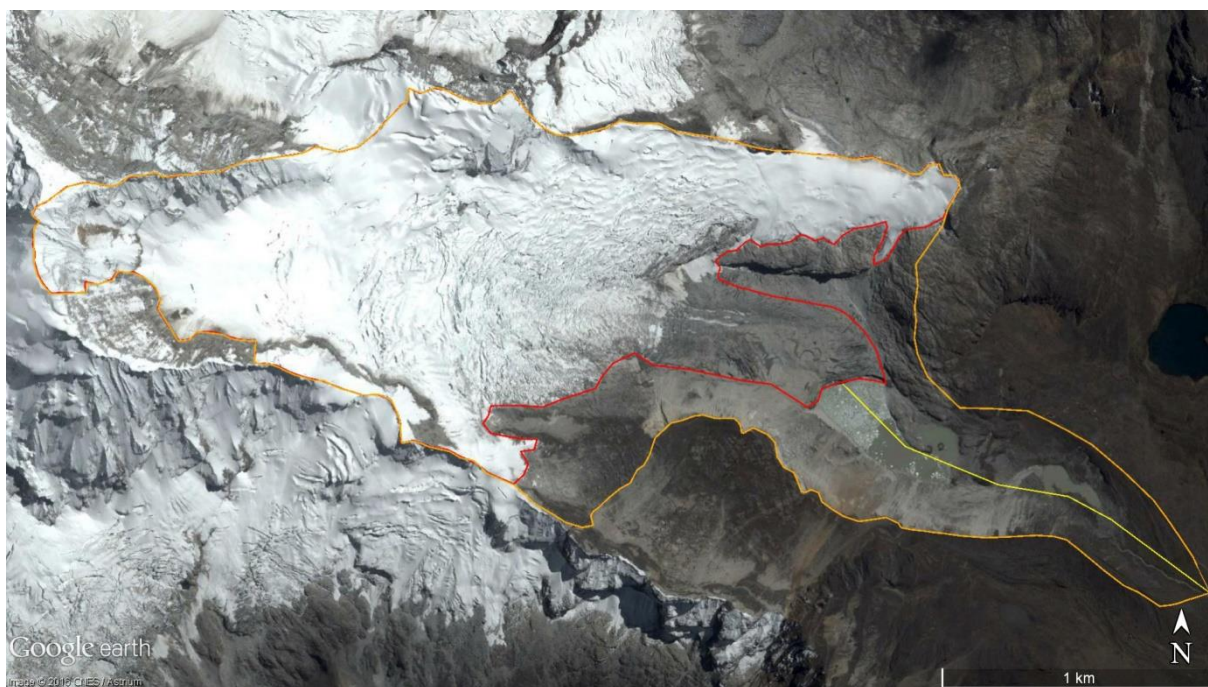
Broggi

Souřadnice: 9° 0' 23.20" j. š., 77° 34' 54.95" z. d.



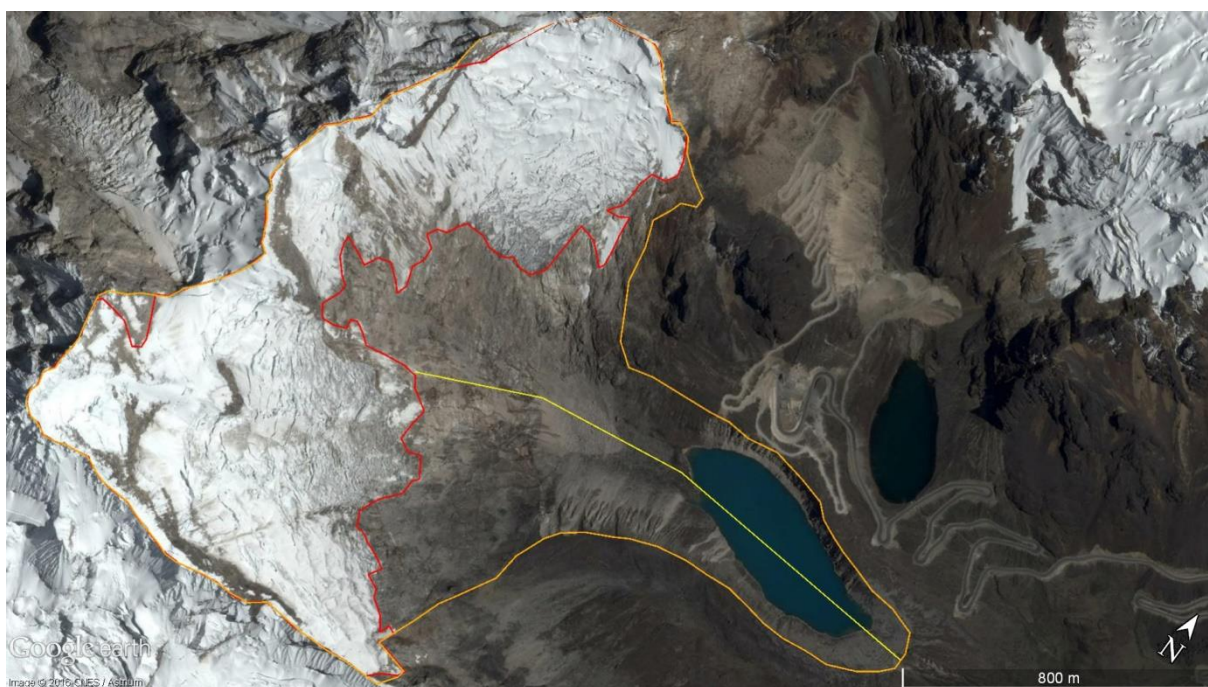
Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	20.8.2013	1,83	0,41	1,42	77,60%	2124	4456	4939	483

Cancahua Souřadnice: 9° 5' 22.59" j. š., 77° 33' 34.93" z. d.



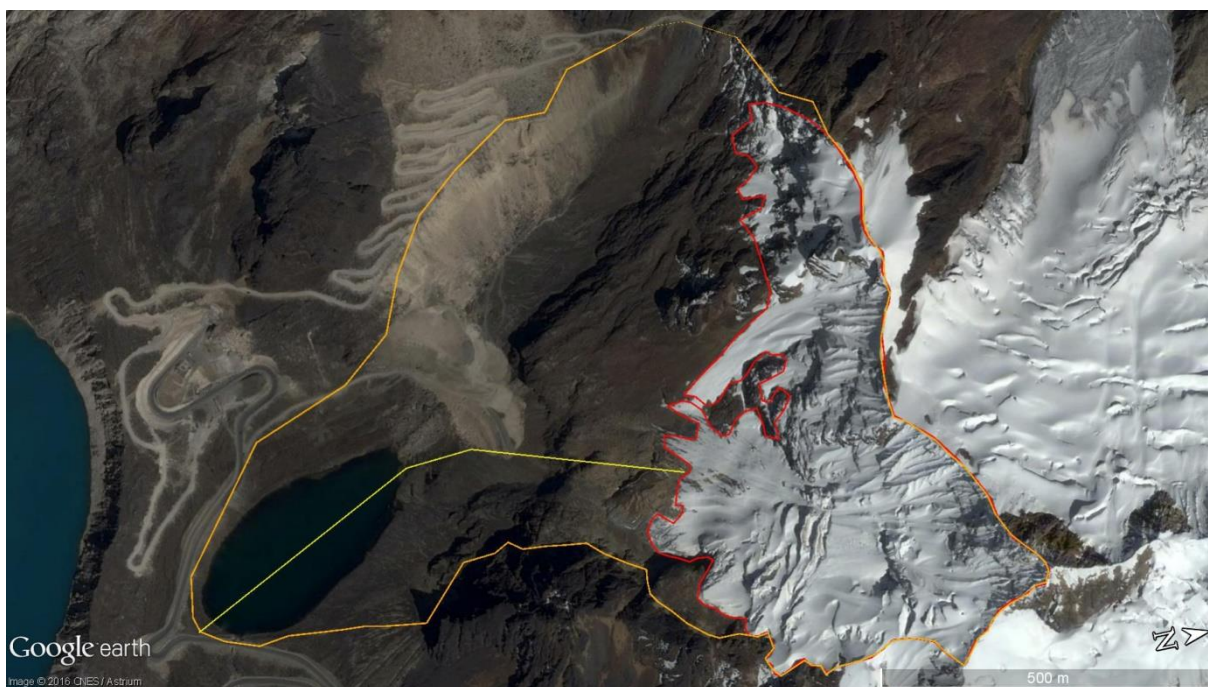
Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	20.8.2013	3,74	2,56	1,18	31,55%	1574	4373	4690	317

Cancaraca 1 Souřadnice: 9° 8' 47.34" j. š., 77° 31' 0.83" z. d.



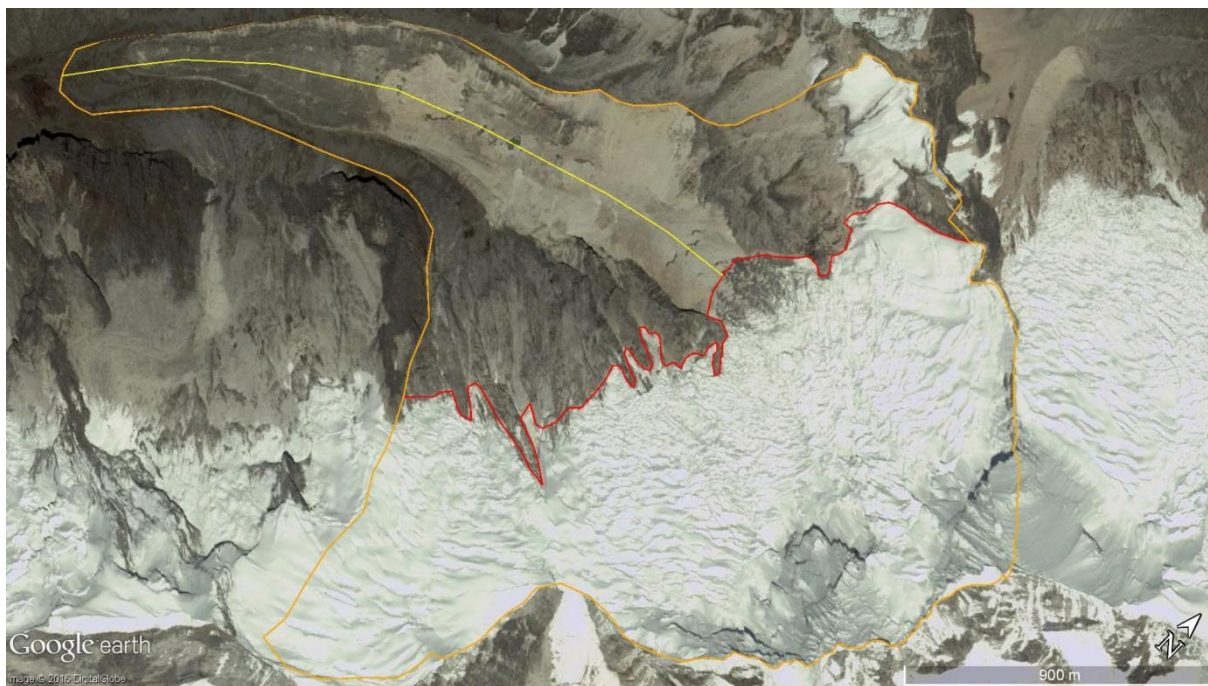
Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	20.8.2013	1,91	1,1	0,81	42,41%	1479	4616	4998	382

Cancaraca 2 Souřadnice: 9° 7' 53.53" j. š., 77° 30' 13.62" z. d.



Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	20.8.2013	0,70	0,24	0,46	65,71%	819	4621	4684	63

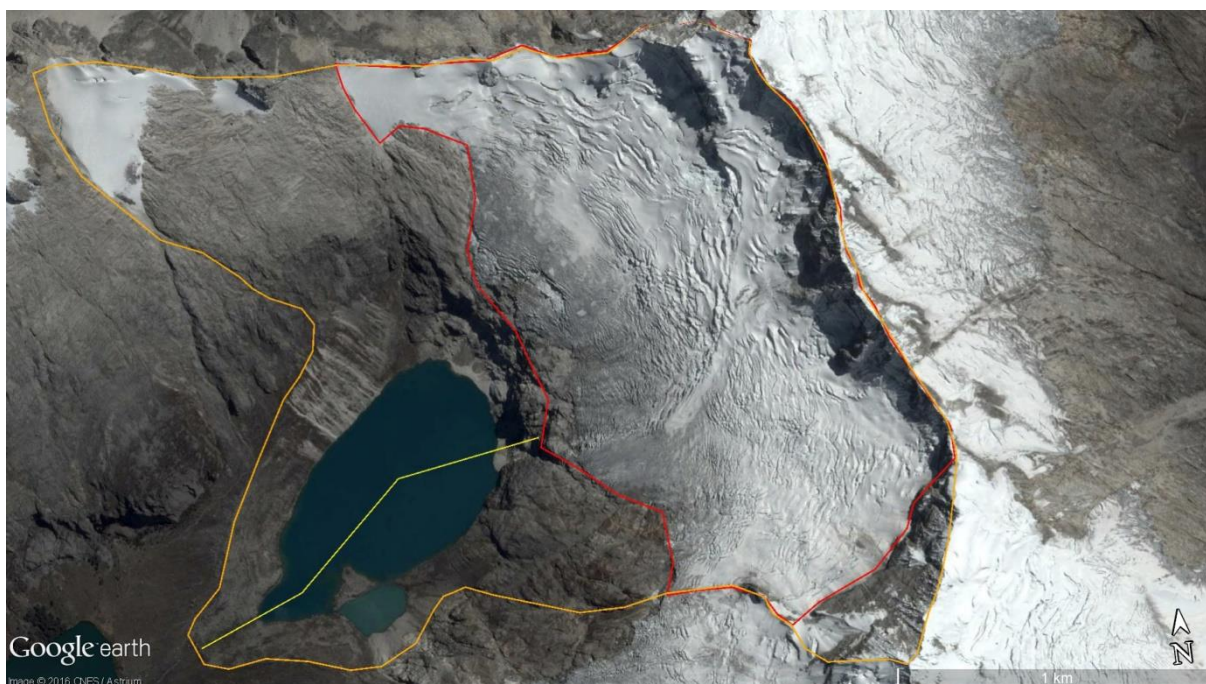
Huandoy Souřadnice: 8° 58' 40.43" j. š., 77° 42' 0.66" z. d.



Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	29.1.2014	3,14	1,77	1,37	43,63%	2084	4534	4822	288

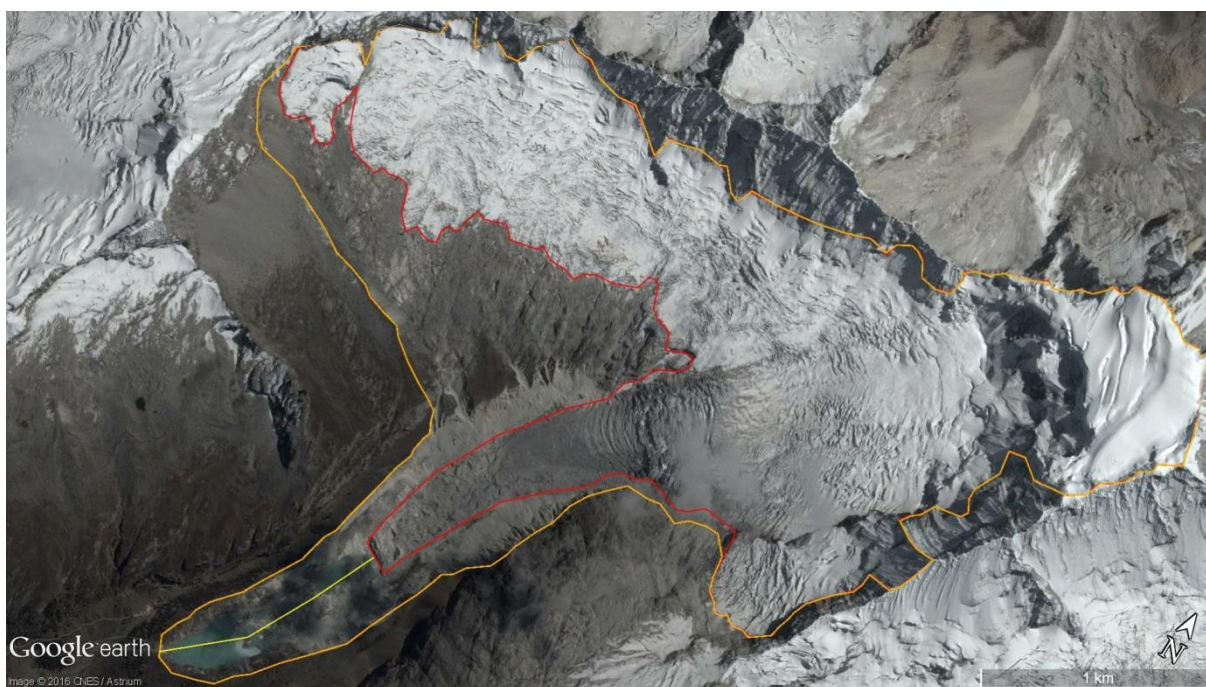
Checouiacraju

Souřadnice: 9° 10' 54.24" j. š., 77° 32' 6.68" z. d.



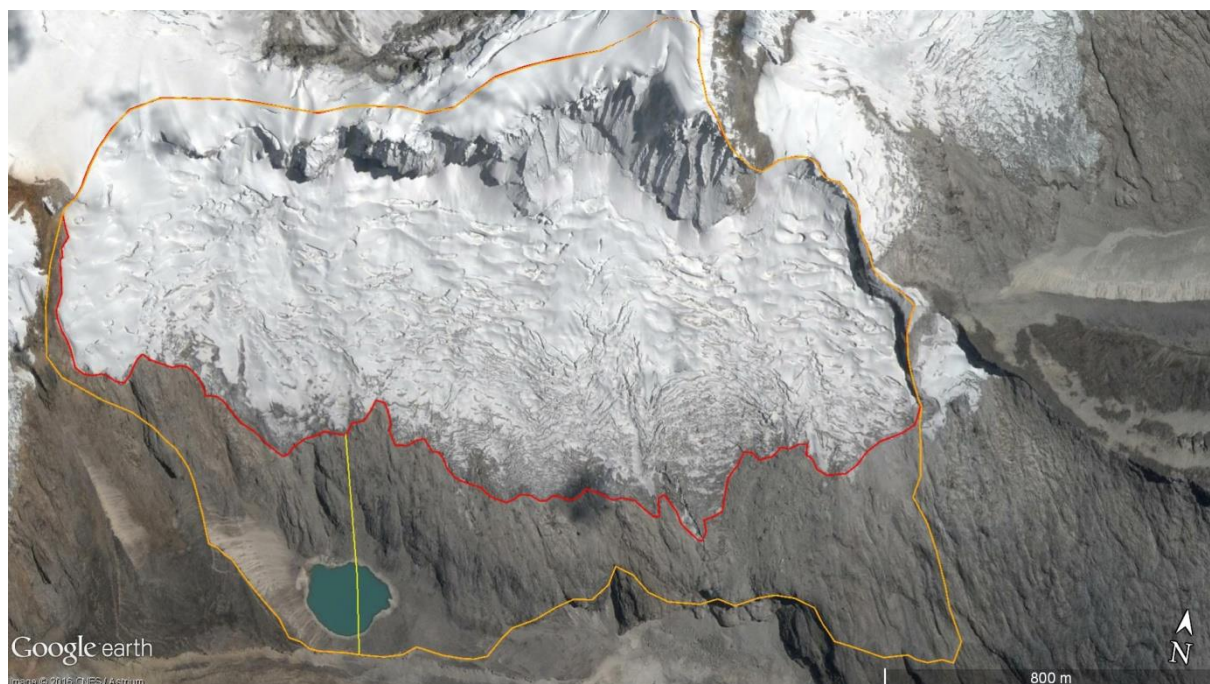
Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	20.8.2013	3,93	1,95	1,98	50,38%	1292	4375	4607	232

Llaca Souřadnice: 9° 24' 58.73" j. š., 77° 25' 48.94" z. d.



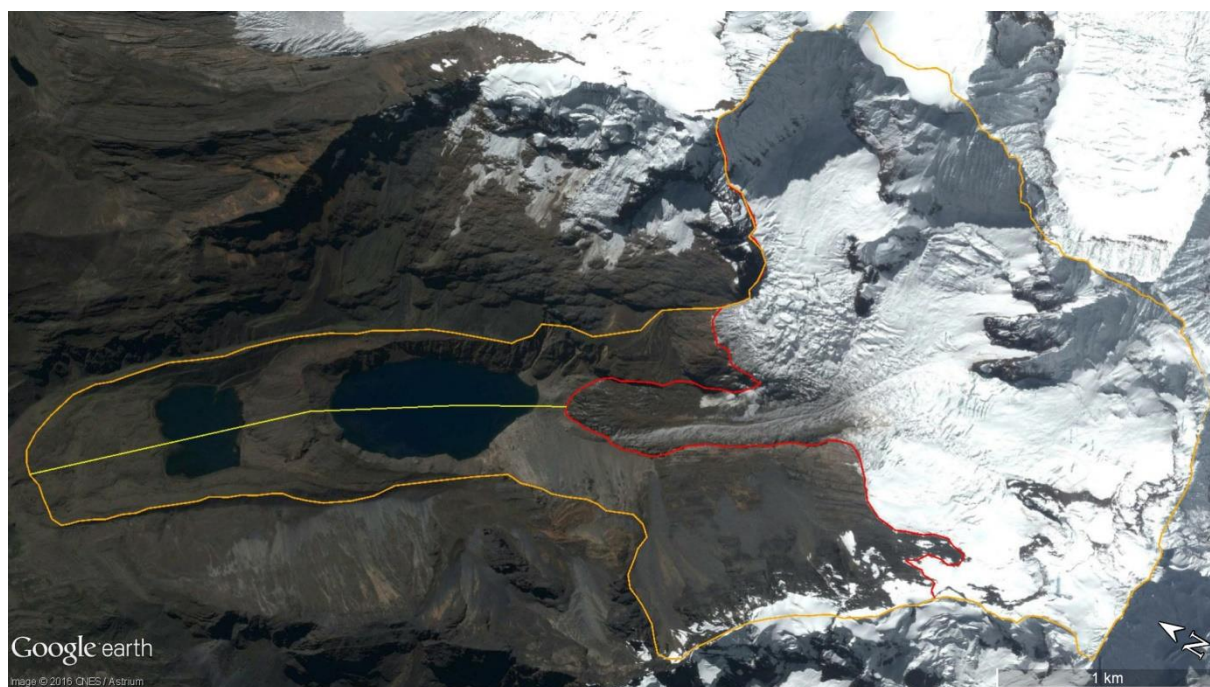
Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	20.8.2013	6,00	4,32	1,68	28,00%	1018	4469	4518	49

Pisco Souřadnice: 9° 0' 58.54" j. š., 77° 38' 8.34" z. d.



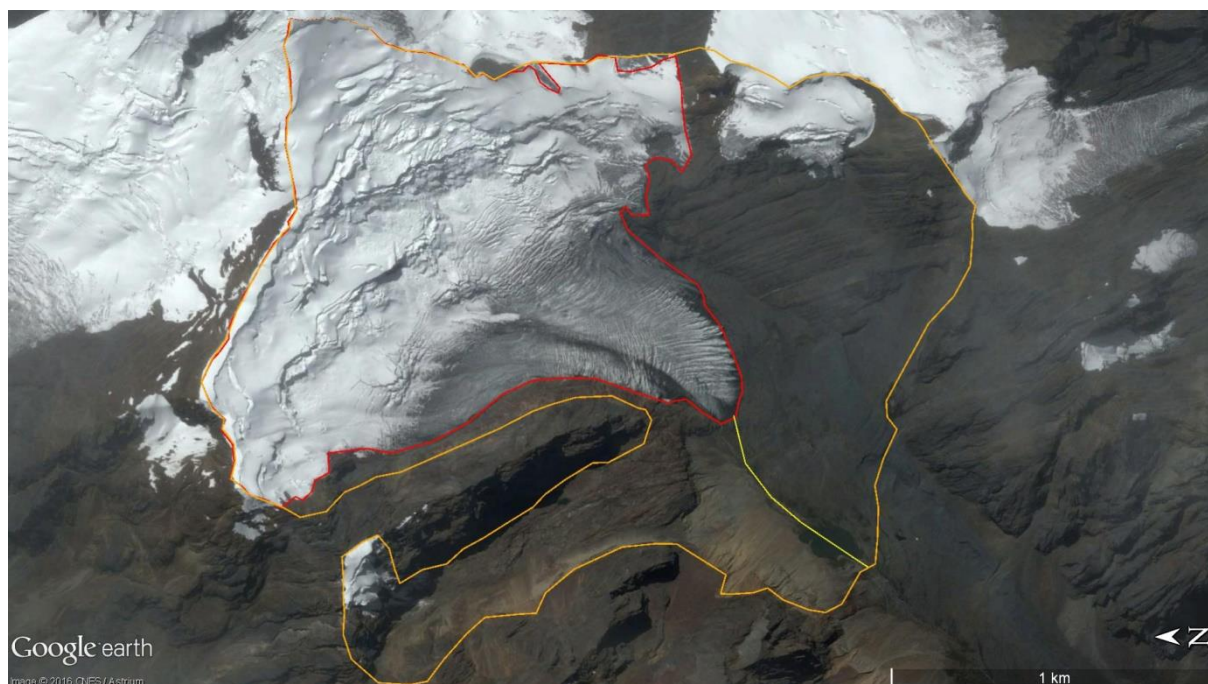
Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
svahový	20.8.2013	2,36	1,64	0,72	30,51%	527	4802	4970	168

Pucajirca Norte Souřadnice: 8° 51' 33.63" j. š., 77° 36' 22.54" z. d.



Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	21.6.2015	6,95	4	2,95	42,45%	2476	4211	4355	144

Uruachraju **Souřadnice:** 9° 35' 12.33" j. š., 77° 18' 56.97" z. d.



Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	28.4.2016	3,10	1,52	1,58	50,97%	651	4549	4700	151

Yanamarey **Souřadnice:** 9° 39' 5.43" j. š., 77° 16' 15.53" z. d.

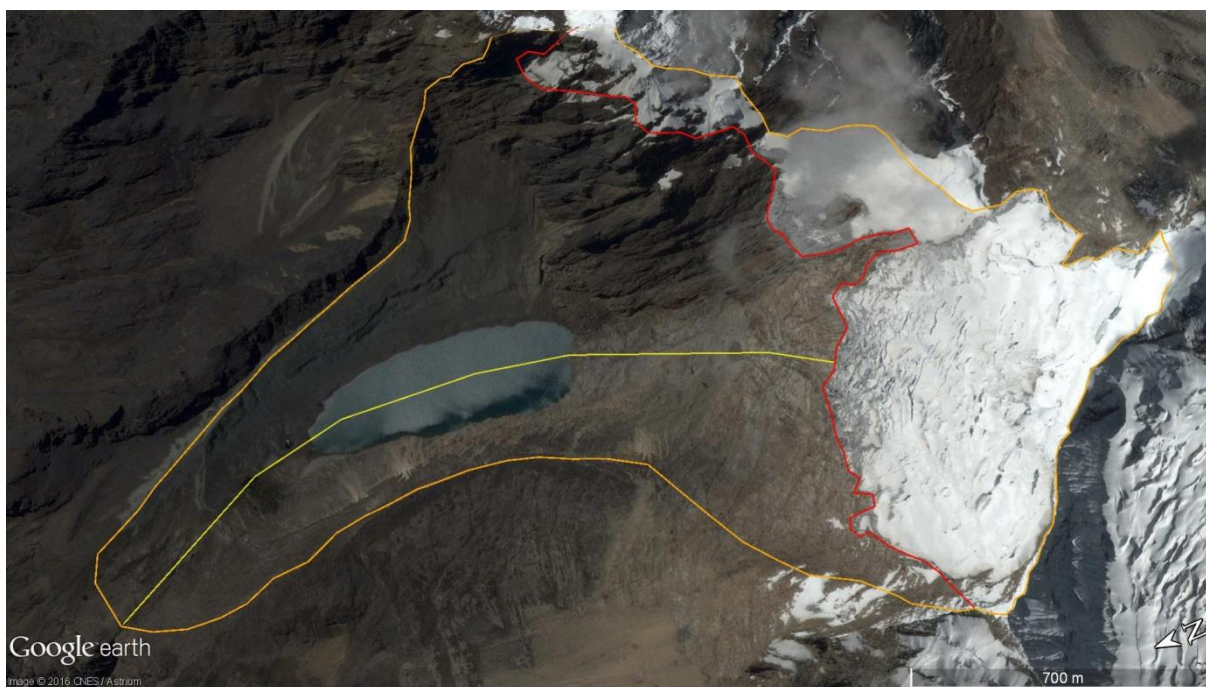


Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	28.4.2016	1,48	0,25	1,23	83,11%	899	4604	4778	174

PŘÍLOHA 3

KATALOG ZKOUMANÝCH LEDOVCŮ S NEDATOVANÝMI MORÉNAMI

Akilpo 1 **Souřadnice:** 9° 19' 29.87" j. š., 77° 24' 41.69" z. d.

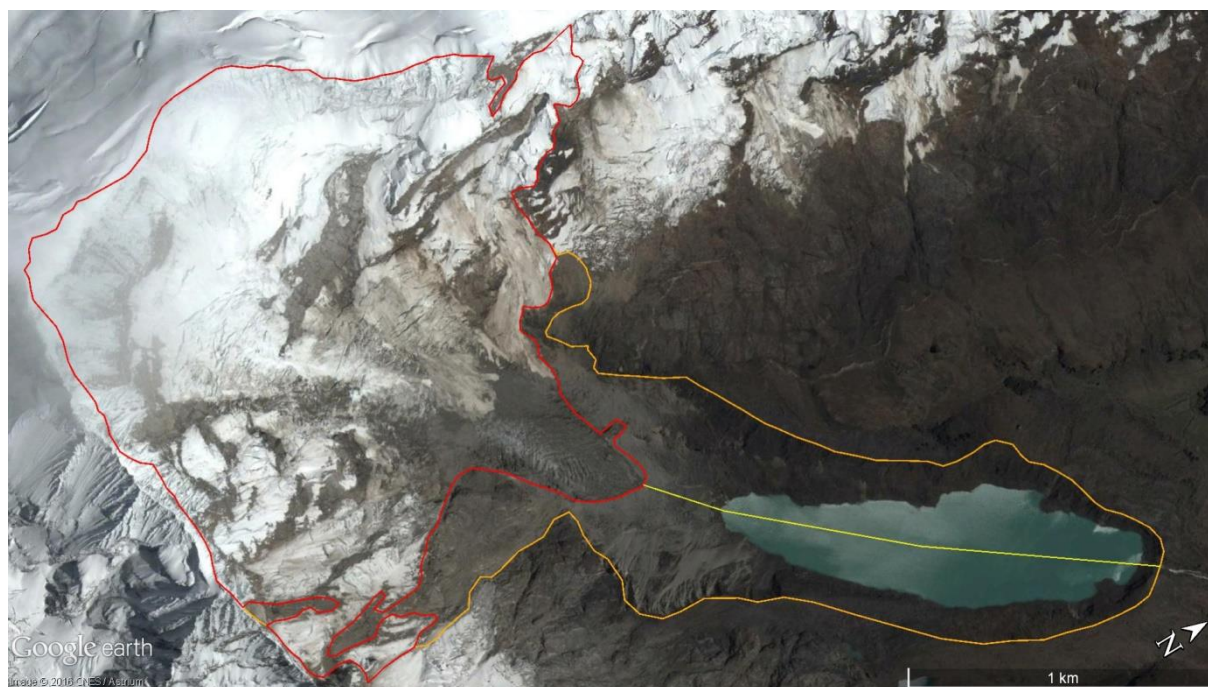


Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	20.8.2013	1,85	0,62	1,23	66,49%	1852	4567	5026	459

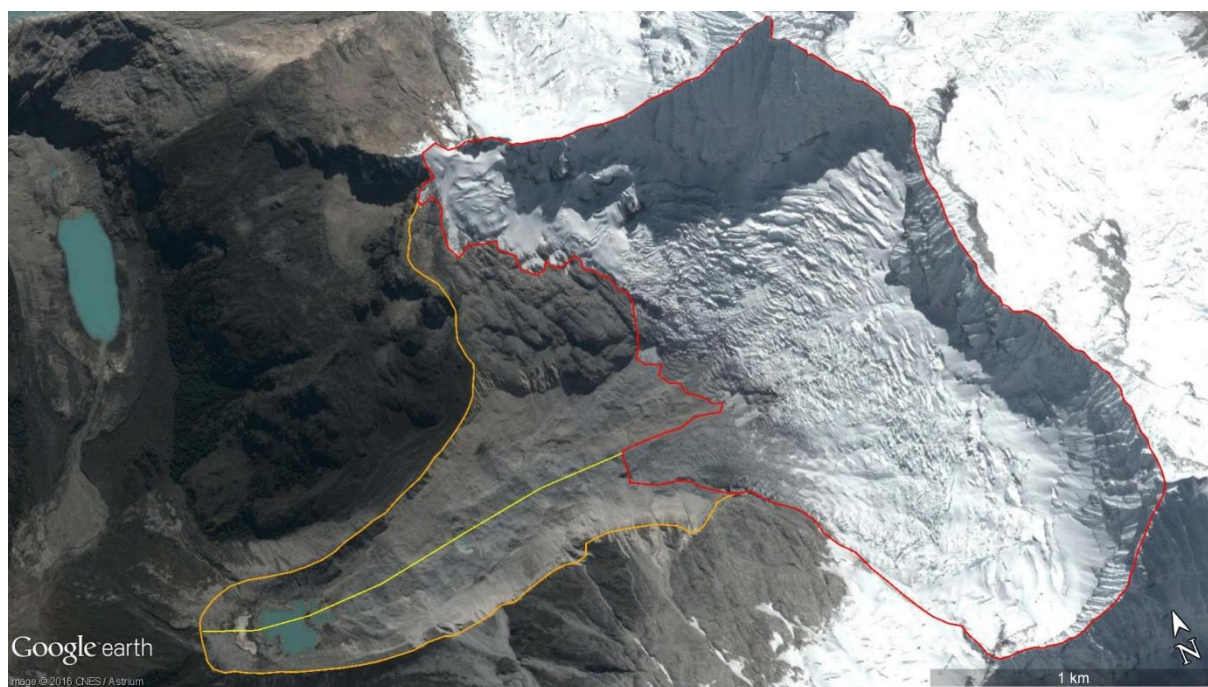
Akilpo 2 **Souřadnice:** 9° 19' 12.58" j. š., 77° 25' 10.25" z. d.



Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
svahový	20.8.2013	0,74	0,28	0,46	62,16%	819	4645	5135	490

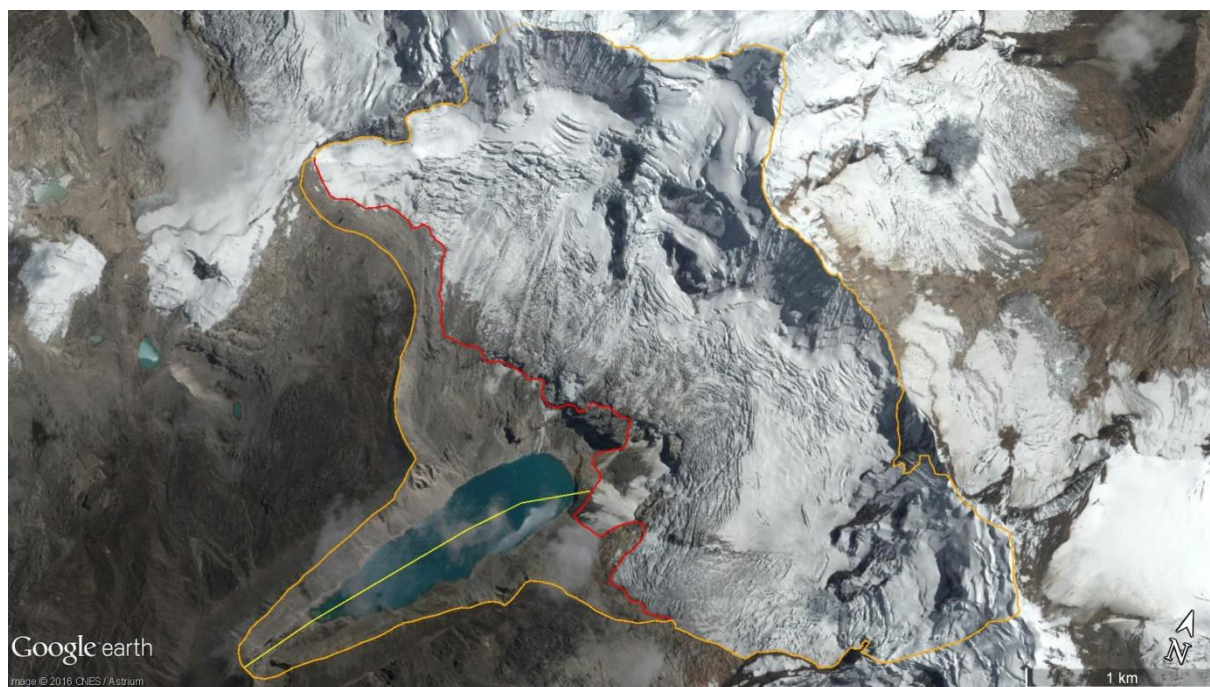
Copa Souřadnice: 9° 15' 53.16" j. š., 77° 28' 33.08" z. d.

Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	20.8.2013	3,65	2,4	1,25	34,25%	1704	4558	4632	74

Chacaraju Souřadnice: 8° 59' 11.63" j. š., 77° 37' 21.46" z. d.

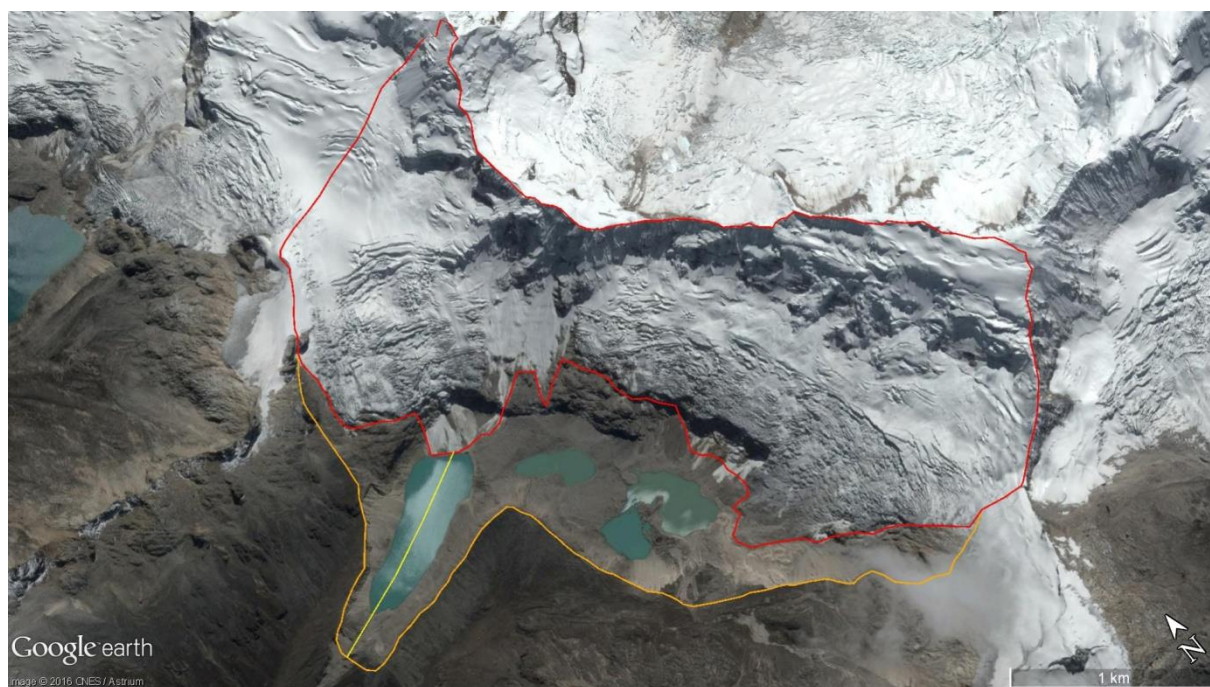
Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	21.5.2016	3,89	2,72	1,17	30,08%	1609	4397	4614	217

Palcacocha Souřadnice: 9° 22' 54.84" j. š., 77° 22' 5.64" z. d.



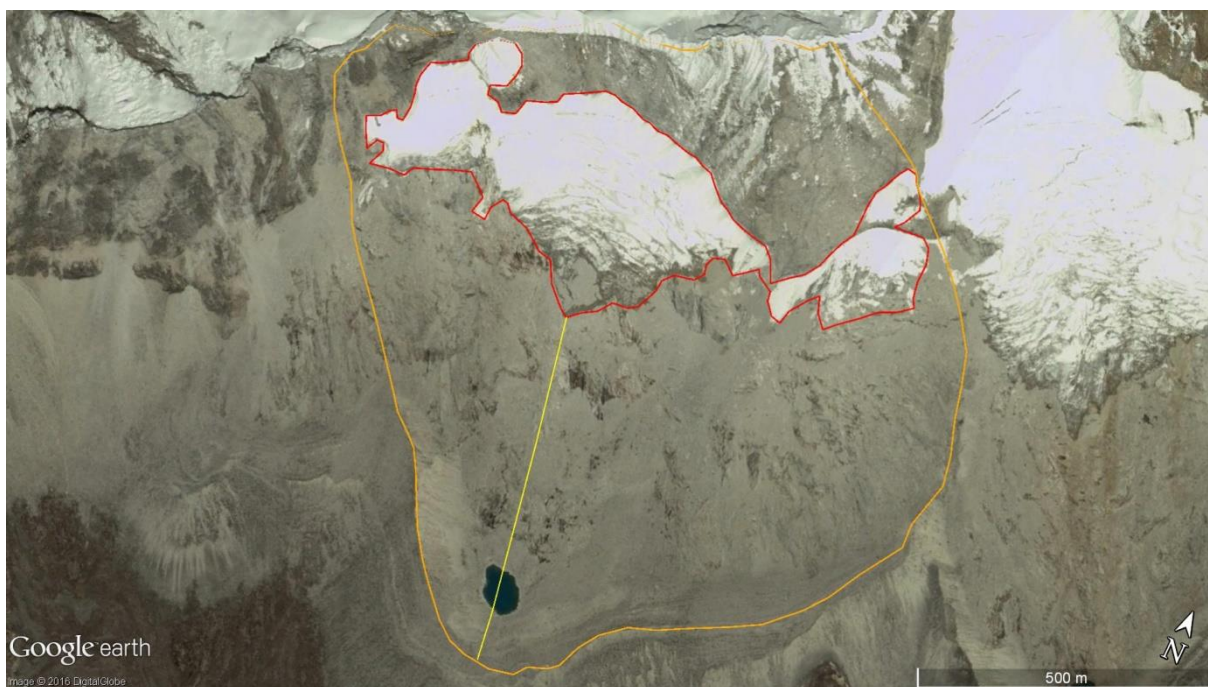
Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	20.8.2013	8,11	6,14	1,97	24,29%	2048	4587	4641	54

Palcaraju Souřadnice: 9° 21' 45.98" j. š., 77° 23' 47.87" z. d.



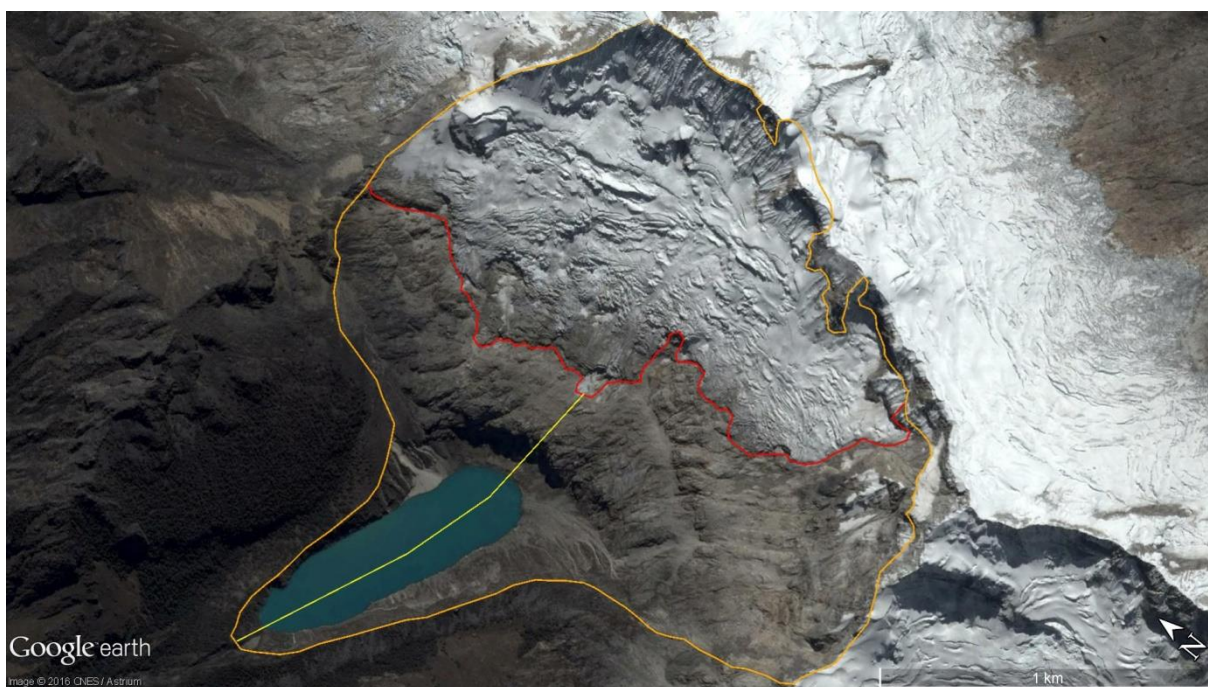
Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	20.8.2013	6,38	4,58	1,8	28,21%	1122	4569	4595	26

Pumapampa Souřadnice: 8° 55' 3.25" j. š., 77° 41' 16.00" z. d.

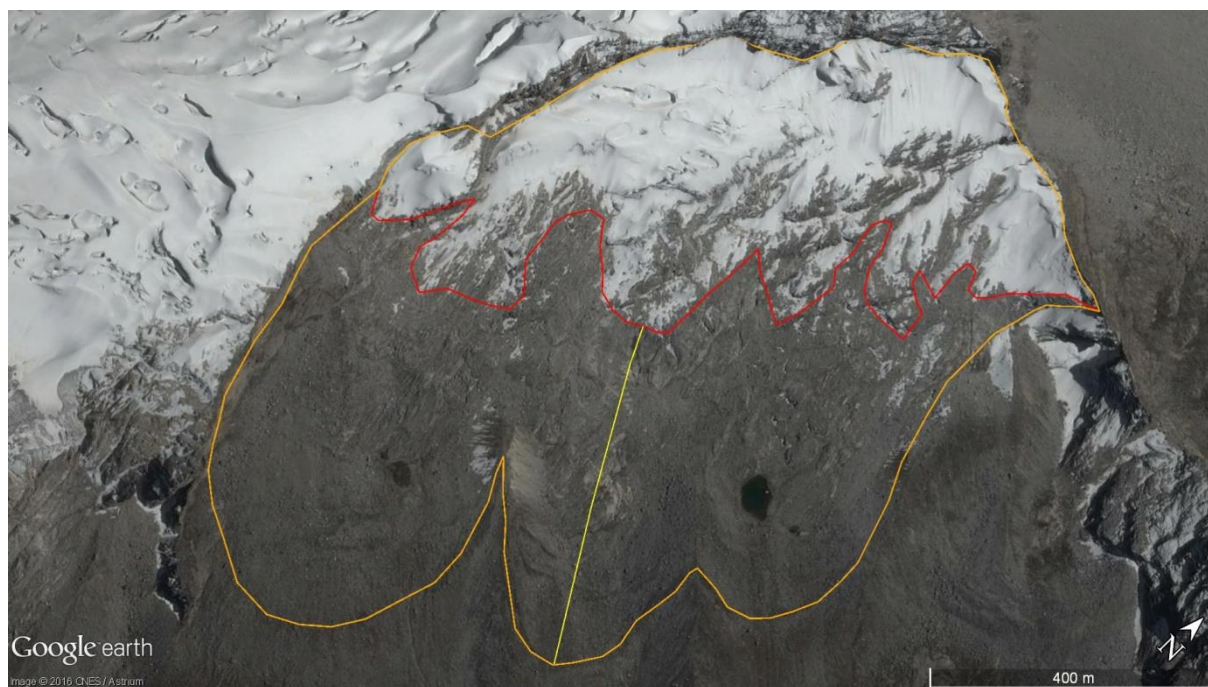


Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
svahový	29.1.2014	0,9	0,18	0,72	80,00%	592	4841	4994	153

Ulta Souřadnice: 9° 9' 45.26" j. š., 77° 31' 56.85" z. d.



Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
údolní	20.8.2013	2,55	1,17	1,38	54,12%	1292	4339	4544	205

Vallunaraju Souřadnice: 9° 25' 42.26" j. š., 77° 27' 23.39" z. d.

Typ ledovce	Datum pořízení satelitního snímku	Rozloha během maxima LIA [km ²]	Současná rozloha (2013-2016) [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [km ²]	Úbytek plochy od maxima LIA - současnost [%]	Vzdálenost ústupu čela ledovce [m]	Výška čela ledovce během maxima LIA [m n. m.]	Současná výška čela ledovce (2013 - 2016) [m n. m.]	Výškový ústup čela ledovce [m]
svahový	20.8.2013	0,58	0,11	0,47	81,03%	489	4904	5178	274