

Studio del bilancio di massa del ghiacciaio Chachacomani (Bolivia) con tecniche Geomatiche

Francesco Rota Nodari ^(a), Martina Aiello ^(a), Renata Vezzoli ^(a), Francesco Polinelli ^(a), Federico Frassy ^(a), Paolo Gallo ^(b), Alessandro Galluccio ^(b), Mariapia Izzo ^(b), Riccardo Scotti ^(b,c), Alvaro Soruco ^(d), Marco Gianinetto ^(a)

(a) Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito, Politecnico di Milano, via Ponzio, 31, 20133 Milano, e-mail: marco.gianinetto@polimi.it

(b) Servizio Glaciologico Lombardo, Milano

(c) Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali (BiGeA), Università di Bologna

(d) Universidad Mayor de San Andrés

Riassunto

Molti ghiacciai Boliviani non sono ancora stati studiati e oggi non hanno un programma di monitoraggio. Questi rivestono però un ruolo importante per la comprensione dell'entità dei cambiamenti climatici globali e locali ma, soprattutto, rappresentano un'importante riserva idrica per milioni di Boliviani. Si stima infatti che durante la stagione secca il 27% delle riserve idriche totali delle città di La Paz (capitale governativa della Bolivia) ed El Alto (nuova città satellite in espansione sull'Altiplano Boliviano) provenga dalla fusione dei ghiacciai della Cordillera Real, da cui dipendono la sopravvivenza di circa 2,3 milioni di abitanti. Questo lavoro presenta l'avvio del progetto quinquennale per lo studio e il monitoraggio del ghiacciaio Chachacomani che ha per capofila il Servizio Glaciologico Lombardo. Con un'estensione di 7,5 km² il Chachacomani rappresenta il ghiacciaio tropicale più grande fino ad ora mai studiato. L'obiettivo principale è valutare le fluttuazioni della riserva idrica disponibile analizzando il bilancio di massa annuale del ghiacciaio e l'apporto nevoso annuale, utilizzando tecniche di Geomatica e Telerilevamento integrate da tradizionali rilievi glaciologici. Il progetto però ha anche risvolti socio/umanitari, tra cui la formazione in loco di operatori glaciologici boliviani in collaborazione con la missione cattolica di Peñas (Universidad-Católica Boliviana), l'Universidad Mayor de San Andrés, e il Ministero del Turismo (Boltur). Inoltre, tra gli aspetti sociali del progetto vi sono la promozione di forme di turismo sostenibile sull'Altiplano di La Paz e sulla Cordillera Real ed il finanziamento di attività educative della scuola di Alto Cruz Pampa.

Introduzione

Molti ghiacciai Boliviani non sono mai stati studiati nel passato e, ad oggi, manca un programma di monitoraggio che permetta di valutarne la dinamica e la disponibilità idrica. Se da un punto di vista scientifico i ghiacciai rivestono un ruolo importante per la comprensione dell'entità dei cambiamenti climatici in atto e dei loro effetti a scala globale, a livello locale rappresentano un'importante riserva idrica per milioni di cittadini. Si stima infatti che, durante la stagione secca circa il 27% delle risorse idriche totali della capitale La Paz e

della città satellite El Alto provengono dalla fusione dei ghiacciai della Cordillera Real. Riserve da cui dipende la sopravvivenza di circa 2,3 milioni di abitanti (Soruco *et al.*, 2015).

Negli ultimi decenni la popolazione di La Paz ed El Alto è cresciuta rapidamente, in seguito all'abbandono dei villaggi dell'Altiplano Boliviano da parte dei più giovani, in cerca di lavoro e condizioni di vita migliori. Con l'aumento della popolazione è cresciuto anche il fabbisogno idrico. Tuttavia, gli ultimi anni sono stati caratterizzati da prolungati periodi di siccità tanto che, nel Novembre 2016, le riserve idriche di La Paz hanno raggiunto i livelli minimi e il governo ha dichiarato lo stato di emergenza. Il successivo razionamento, esteso a molti settori ed attività, ha generato forti tensioni sociali. Di conseguenza, è diventato indifferibile stimare la reale disponibilità idrica dei ghiacciai della Cordillera Real e studiarne la vulnerabilità ai cambiamenti climatici in atto.

Le tecnologie spaziali di osservazione della Terra sono uno strumento molto utile per la quantificazione del ritiro dei ghiacciai e le immagini satellitari consentono di ricavare alcuni parametri difficilmente misurabili in campo, integrando quindi nel tempo e nello spazio le misure in situ. Non solo, spesso la difficoltà di raggiungere i ghiacciai rende le tecnologie di Telerilevamento l'unico strumento per poterli studiare. Inoltre, la possibilità di estendere l'analisi al passato, la ripetibilità delle osservazioni e la disponibilità di archivi gratuiti (e.g. Landsat e Sentinel), rendono le immagini riprese da satellite un ausilio indispensabile nello studio delle caratteristiche e delle dinamiche dei ghiacciai e offrono un interessante supporto per la modellistica di evoluzione futura. Quest'ultimo aspetto è particolarmente importante se si pensa ai notevoli impatti che le trasformazioni dei ghiacciai generano a livello globale (e.g. aumento del livello dei mari), regionale (e.g. inondazioni) e locale (e.g. dissesti idrogeologici).

Questo lavoro presenta l'avvio del progetto quinquennale coordinato dal Servizio Glaciologico Lombardo per lo studio e il monitoraggio del ghiacciaio Chachacomani, mai studiato in precedenza. Il progetto è realizzato in collaborazione con l'Universidad Mayor de San Andres e con l'Universidad Católica Boliviana ed ha l'obiettivo di valutare le fluttuazioni della riserva idrica disponibile nel ghiacciaio analizzando il bilancio di massa annuale e l'apporto nevoso annuale mediante tecniche di Geomatica e Telerilevamento, integrate da tradizionali rilievi glaciologici. Non si tratta però solamente di una missione scientifica. Tra i risvolti umanitari e di cooperazione allo sviluppo vi sono attività di formazione professionale in loco realizzate in collaborazione con la missione cattolica di Peñas.

Ad oggi, i risultati riguardano una prima ricostruzione dell'evoluzione del ghiacciaio dal 1975 al 2016 utilizzando immagini Landsat e Sentinel-2. Di seguito, si presentano i risultati delle prime analisi relativamente agli obiettivi preliminari di: (i) valutare le variazioni areali della superficie del ghiacciaio Chachacomani e dell'arretramento delle sue fronti e (ii) identificare e mappare le aree di ablazione, il bacino d'accumulo e la linea di equilibrio (ELA) del ghiacciaio dal 1975 al 2016. Tali attività hanno permesso di definire lo stato di

fatto del Chachacomani e sono state propedeutiche alla prima campagna di misura sul ghiacciaio (Agosto 2018) nel corso della quale sono state inserite 11 paline ablatometriche che nei prossimi anni permetteranno di quantificare gli spessori di ghiaccio persi a causa dei processi di ablazione. Inoltre, nell'ambito della campagna di misura, sono stati effettuati sondaggi e stratigrafie del manto nevoso per la determinazione degli accumuli e misure frontali.

Area di studio

Le Ande tropicali ospitano più del 99% di tutti i ghiacciai tropicali, di cui il 19% si trova proprio sulla Cordillera Real in Bolivia (Rabatel *et al.*, 2013). A causa delle particolari condizioni climatiche che caratterizzano la fascia tropicale (i.e. angolo di incidenza dei raggi solari sulla superficie e maggiore numero di ore d'insolazione al giorno), diversamente dai comuni ghiacciai montani, i ghiacciai tropicali sono soggetti a fusione durante tutto l'anno. Bastano quindi piccole variazioni nelle temperature e nelle precipitazioni per registrare importanti variazioni nei bilanci di massa (Rabatel *et al.*, 2013). A causa della loro elevata sensibilità ai cambiamenti del clima, sono stati indicati dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) come indicatori chiave del cambiamento climatico recente (Rabatel *et al.*, 2013).

L'Altiplano di La Paz si estende tra la Cordillera Real e la Cordillera Occidentale, con un'altitudine media di 4.000 m s.l.m. Qui vivono le comunità Aymara e Quechua, popolazioni considerate tra le più povere della Bolivia e quindi di tutto il Sud America (Winters, 2012). La loro economia è in larga parte fondata sul commercio locale dei prodotti che riescono a coltivare (i.e. patate, quinoa, mais) e dei derivati dell'allevamento di lama, alpaca, pecore e mucche. Questa terra alta, secca, fredda e poco fertile è difficile da coltivare poiché vulnerabile al gelo, alle piogge irregolari, all'erosione e alla forte radiazione solare. Gli agricoltori (generalmente donne) praticano metodi di agricoltura molto tradizionali senza l'utilizzo di macchinari, di sistemi di raccolta d'acqua e di irrigazione. Anche i rendimenti della pastorizia sono bassi per via della povertà dei pascoli. Queste comunità sono quindi estremamente vulnerabili ai cambiamenti climatici e gran parte dell'acqua potabile che utilizzano per la coltivazione dei loro piccoli campi o per il bestiame, deriva dalla fusione dei ghiacciai (Painter *et al.*, 2009).

Il clima nella regione dell'Altiplano è caratterizzato da temperature quasi costanti durante l'anno e da una forte stagionalità delle precipitazioni; circa l'84% della precipitazione si registra durante la stagione umida (Ottobre-Marzo) mentre nella stagione secca (Aprile-Settembre) cade il rimanente 16% (Soruco *et al.*, 2015). Le temperature sono raramente inferiori a 0°C e nella stagione umida sono mediamente più elevate di 1 o 2 °C rispetto alla stagione secca (Rabatel *et al.*, 2013). L'anno idrologico va da Settembre ad Agosto. Il periodo tra Ottobre e Dicembre è caratterizzato da una considerevole fusione del ghiaccio in corrispondenza della zona di ablazione, essenzialmente dovuta alla scarsa copertura di neve residua sulla superficie del ghiacciaio e alla forte radiazione solare. Il periodo compreso tra Gennaio e Marzo corrisponde al culmine della stagione umida e coincide con il periodo di accumulo dei

ghiacciai, mentre nei mesi tra Maggio e Agosto (stagione secca) il tasso di accumulo è molto limitato e prevalgono i processi di sublimazione. In questo contesto, il ghiacciaio Chachacomani si trova a circa 60 km da La Paz (3.640 m s.l.m.), sulle vette della Cordillera Real che si estende per 125 km in lunghezza e 20 km in larghezza. Il Chachacomani ha un'estensione di circa 7,5 km² ed è a quota compresa tra i 5.200 e i 6.074 m s.l.m. (Figura 1).

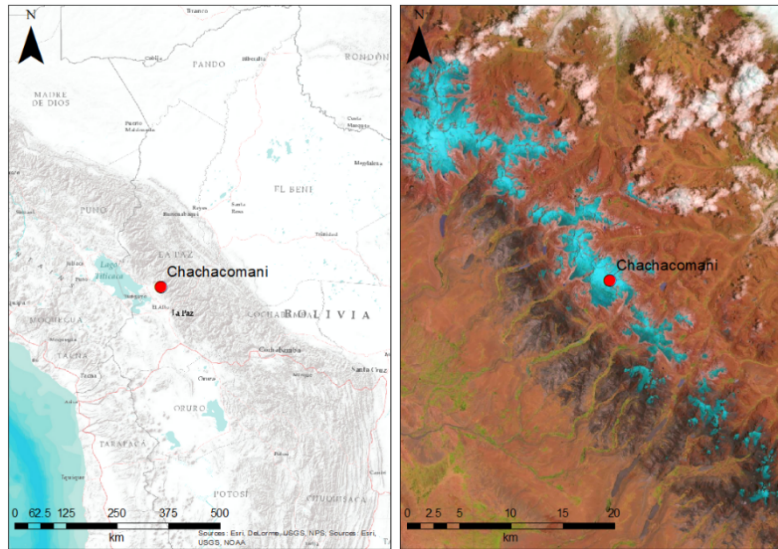


Figura 1. **Pannello di sinistra:** posizione del ghiacciaio Chachacomani rispetto alla città di La Paz. **Pannello di destra:** rappresentazione infrarosso falso colore della Cordillera Real (immagine Sentinel-2 del 13.11.2016).

Primi risultati

Questo studio copre il periodo 1975-2016. Per valutare la vulnerabilità del ghiacciaio Chachacomani ai cambiamenti climatici è stato necessario ricostruirne la dinamica, in termini di area coperta, e valutare il legame di tali variazioni con le condizioni climatiche osservate. L'assenza di rilievi storici in situ è stata sopperita con il Telerilevamento satellitare (Landsat e Sentinel-2) che ha permesso di mappare le variazioni dell'area glaciale (Figure 2 e 3).

Studi analoghi in regioni limitrofe hanno mostrato come la dinamica dei ghiacciai tropicali segua il trend delle temperature medie, nonché le oscillazioni climatiche legate alle variazioni di temperatura dell'Oceano Pacifico (Vuille *et al.*, 2008; Rabatel *et al.*, 2013; López-Moreno *et al.*, 2014). Nel nostro caso, lo studio del Chachacomani evidenzia una continua e progressiva contrazione dell'apparato glaciale: la superficie del ghiacciaio è diminuita di oltre il 16% in 40 anni (Figure 2 e 3). Sebbene questa possa sembrare una riduzione di limitata entità, in realtà è una variazione molto significativa perché il ghiacciaio si trova a quote superiori ai 5.000 m s.l.m. Inoltre, il Chachacomani ha un'esposizione favorevole al mantenimento della massa glaciale (Sud).

L'analisi della variazione superficiale e dell'arretramento della fronte valliva principale mettono in evidenza le seguenti fasi:

1) Tra la fine degli anni '70 e i primi anni '80 il ghiacciaio Chachacomani ha una dinamica quasi stazionaria, con modestissima avanzata della fronte principale;

2) Negli anni '80, si osserva una decisa contrazione del ghiacciaio Chachacomani, maggiormente accentuata nella prima parte del decennio (1980-1984);

3) Segue un nuovo periodo stazionario (1990 e il 1997) nel quale la superficie del ghiacciaio Chachacomani non muta significativamente;

4) L'ultimo periodo (1997-2016) è infine caratterizzato dal continuo ritiro del ghiacciaio Chachacomani, fenomeno che però parrebbe rallentare negli ultimi anni.

Questa dinamica concorda con le osservazioni di altri ghiacciai tropicali (López-Moreno *et al.*, 2016) e segue il trend delle temperature medie annuali registrate sull'Altiplano (Figura 4).

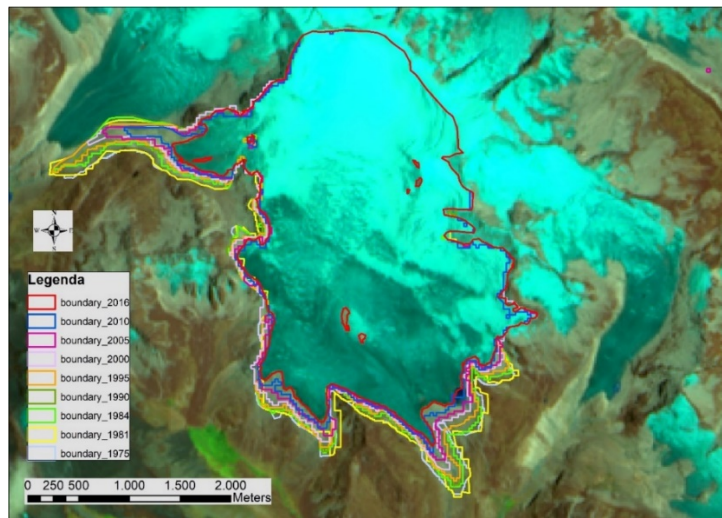


Figura 2. Variazione superficiale del ghiacciaio Chachacomani nel periodo 1975-2016 ricostruita mediante immagini satellitari Landsat e Sentinel-2.

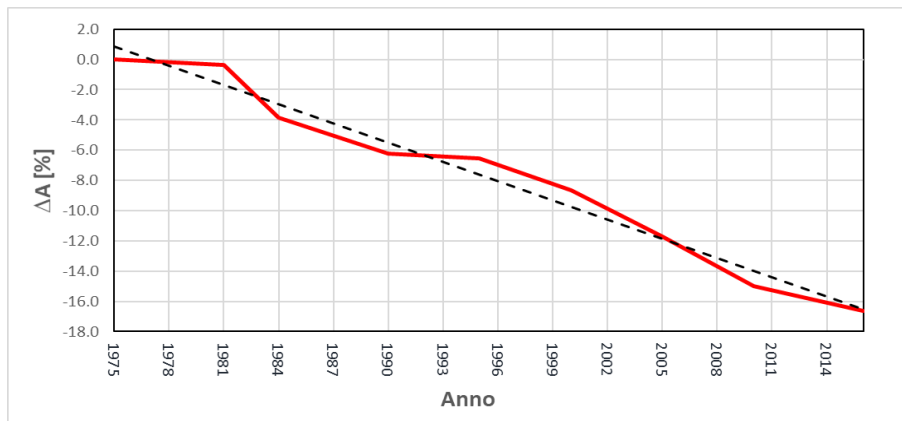


Figura 3. In rosso è mostrata la variazione superficiale del ghiacciaio Chachacomani rispetto alla copertura del 1975 ($\square A$). In nero è riportata linea di tendenza.

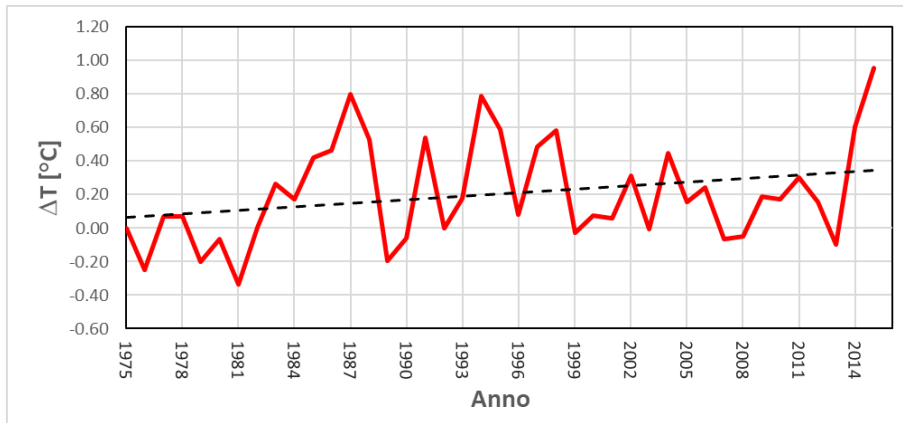


Figura 4. In rosso è mostrata la variazione della temperatura media annuale dell'area di studio rispetto al 1975 (ΔT). In nero è riportata la linea di tendenza. (Fonte: Climatic Research Unit, University of East Anglia, <http://www.cru.uea.ac.uk/data>)

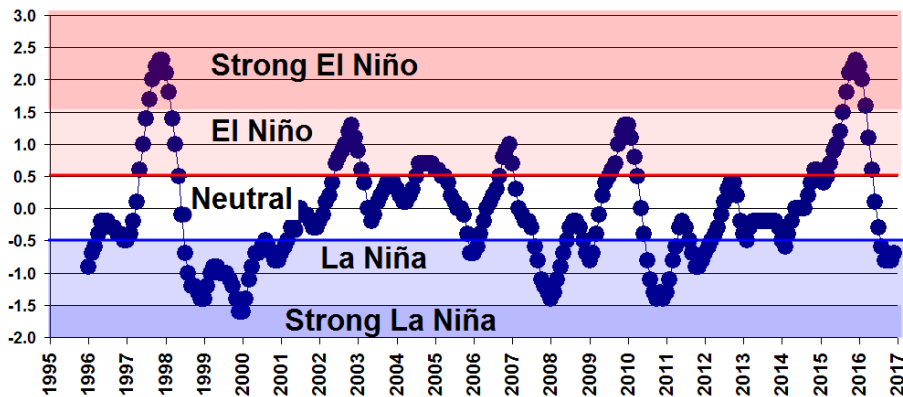


Figura 5. Serie temporali delle variazioni dell'indice CPC's Oceanic Niño Index (ONI) dal 1996 al 2017 (Fonte: Guam Hydrologic Survey, <http://www.guamhydrologicsurvey.com/index.php/climate-and-weather/>)

Alcune ricerche mostrano una correlazione tra l'Accumulation Area Ratio (AAR), definito dal rapporto tra l'estensione dell'area di accumulo e l'area totale del ghiacciaio, e lo "stato di salute" dell'apparato glaciale (Meier e Post, 1962). Allo stesso modo, l'Equilibrium-Line Altitude (ELA), linea che individua la quota alla quale l'ablazione è esattamente compensata dall'accumulo (Benn e Lehmkuhl, 2000), è un indicatore sensibile alle variazioni climatiche locali.

Lo studio della dinamica dei bacini d'accumulo e di ablazione del ghiacciaio Chachacomani fornisce interessanti indicazioni per la comprensione dei cambiamenti climatici in atto in Bolivia. L'AAR e la ELA sono stati valutati dalle immagini Landsat e Sentinel-2 nel periodo di massima ablazione (Novembre-Dicembre degli anni 2010, 2011, 2016 e 2017). Per quanto riguarda l'AAR, le variazioni osservate risultano strettamente correlate all'ENSO (El Niño-Southern Oscillation), fenomeno climatico che rappresenta il maggiore fattore di variabilità nel bilancio di massa inter-annuale sull'Altiplano Boliviano (Figura 5). Durante la fase di El Niño, infatti, si verifica un aumento delle temperature medie mensili e una diminuzione delle precipitazioni, con conseguenti bilanci di massa molto negativi. Al contrario, durante La Niña, si registra una diminuzione delle temperature medie mensili e un aumento delle precipitazioni, con bilanci di massa meno negativi o leggermente positivi.

Le prime misure sul ghiacciaio Chachacomani hanno confermato questa dinamica: negli anni 2010 e 2016 gli effetti di El Niño sono stati rilevanti e il ghiacciaio ha fatto registrare valori di AAR pari a 0,36 (2010) e 0,37 (2016). Ciò significa che l'estensione dell'area di accumulo è stata decisamente inferiore alla soglia del 60-70% necessaria per avere bilanci di massa positivi o neutri (Kaser e Osmaston, 2002). Al contrario, nel 2017 El Niño è stato sostanzialmente neutro per quasi tutto l'anno e l'AAR misurato è salito a 0,55. Ben più marcato è stato l'aumento dell'AAR misurato nel 2011, anno caratterizzato dalla presenza de La Niña, quando la neve residua copriva ben il 73% della superficie del ghiacciaio. La Figura 6 mostra un esempio.

Anche la ELA, strettamente correlata all'AAR, assume valori molto variabili in funzione delle fasi dell'ENSO. Nel 2011, periodo con La Niña moderata, si posizionava ad una quota media di 5,270 m s.l.m.; nel 2016, con fase El Niño molto intensa, è risalita di quasi quasi 270 m portandosi ad una quota media di 5,539 m s.l.m.

Sulla base di questa analisi preliminare, nel mese di Agosto 2018 sono state posizionate 11 paline ablatometriche nell'area di ablazione del ghiacciaio ed in prossimità della ELA. Ciò consentirà di monitorare le variazioni annuali degli spessori di ghiaccio. Nel bacino di accumulo sono stati invece eseguiti alcuni sondaggi per stimare la densità e lo spessore del manto nevoso. Le informazioni fornite dalle paline e dai sondaggi, integrate da rilievi GPS in modalità RTK e ricostruzioni fotogrammetriche da drone, completeranno il bilancio di massa fornendo un quadro dello "stato di salute" del ghiacciaio Chachacomani e della sulla risorsa idrica.

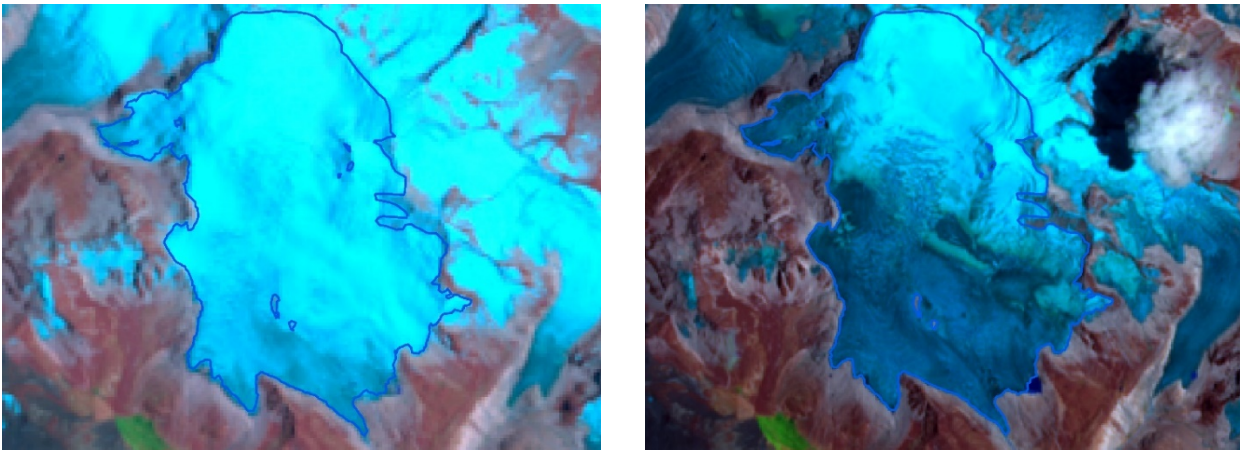


Figura 6. Esempio di stima dell'Accumulation Area Ratio. **Pannello di sinistra:** il ghiacciaio Chachacomani nel novembre 2011, stagione caratterizzata da La Niña. Si nota la superficie del ghiacciaio quasi interamente coperta da neve (AAR=0.73). **Pannello di destra:** il ghiacciaio Chachacomani nel novembre 2016, stagione caratterizzata da El Niño. La neve residua si trova praticamente solo sul plateau sommitale del ghiacciaio (AAR=0.37). Nell'immagine si nota il firn della stagione precedente.

Conclusioni

In questo lavoro sono stati presentati i primi risultati dello studio del ghiacciaio boliviano Chachacomani, nella Cordillera Real. Lo studio ha usato una serie temporale di immagini Landsat e Sentinel-2 riprese tra il 1975 e il 2017.

Le immagini satellitari mostrano una progressiva riduzione dell'apparato glaciale, con perdita di oltre il 16% di coperta negli ultimi 40 anni. Ad una prima analisi, sia l'Accumulation Area Ratio sia l'Equilibrium-Line Altitude del Chachacomani appaiono molto correlati alle oscillazioni dell'ENSO, fenomeno responsabile di variazioni anche molto rilevanti tra due anni consecutivi.

Questi risultati confermano quanto emerso in altri studi sui ghiacciai tropicali. In particolare, ricerche analoghe sui ghiacciai boliviani Charquini, Chacaltaya e Zongo mostrano un arretramento delle fronti e perdita di massa glaciale, soprattutto negli ultimi decenni. A differenza di questi ultimi, il Chachacomani ha però avuto una minore contrazione areale e ciò è probabilmente dovuto alle sue maggiori dimensioni e alla sua particolare morfologia che lo rendono più resiliente.

L'utilizzo delle immagini satellitari aggiunge sistematicità alle attività di monitoraggio del Chachacomani e, in un contesto geografico come quello dell'Altiplano Boliviano dove la disponibilità della risorsa idrica sembra essere in diminuzione, permetterà di fornire ai *policy maker* valutazioni più accurate per una gestione consapevole di questo bene essenziale. Le campagne di misura in situ già programmate nei prossimi anni, integrate delle analisi di Telerilevamento, ci consentiranno di valutare la resilienza di questo importante ghiacciaio tropicale ai cambiamenti climatici in atto in Bolivia.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano sentitamente i) Regione Lombardia, Club Alpino Italiano (sezioni e sottosezioni di Milano, Bergamo e Corsico), il Comitato Glaciologico Italiano e il Ministero del Turismo Boliviano BOLTUR per il patrocinio al progetto; ii) i partner tecnici Trimble Italia ed Esri Italia per la strumentazione scientifica e i software per la gestione e la pubblicazione dei dati ambientali; iii) i partner tecnici Climbing Technology, Ferrino, Gaibana, Mountain Equipment, Demon, Zamberlan, Beer, Ferrino per il materiale alpinistico; iv) la Missione cattolica di Peñas e l'Associazione Onlus Mani Aperte Kamasa per il supporto organizzativo e logistico durante le campagne di misura in Bolivia; v) lo studio legale Albè e Associati; vi) la Scuola di volo Nando Groppo e Fowa per la consulenza sull'uso del drone in ambienti estremi.

Bibliografia

López-Moreno J.I., Moran-Tejeda E., Vicente-Serrano S.M., Bazo J., Azorin-Molina C., Revuelto J., Sanchez-Lorenzo A., Navarro-Serrano F., Aguilar E., Chura O. (2016), "Recent temperature variability and change in the Altiplano of Bolivia and Peru", *International Journal of Climatology*, 36(4): 1773-1796.

Soruco A., Vincent C., Rabatel A., Francou B., Thibert E., Sicart J.E., Condom T. (2015) "Contribution of glacier runoff to water resources of La Paz city, Bolivia (16°S)", *Annals of Glaciology*, 56(70): 147-154.

López-Moreno J.I., Fontaneda S., Bazo J., Revuelto J., Azorin-Molina C., Valero-Garcés B., Morán-Tejeda E., Vicente-Serrano S.M., Zubieta R., Alejo-Cochachín J. (2014), "Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru", *Global and Planetary Change*, 112: 1-11.

Rabatel A., Francou B., Soruco A., Gomez J., Cáceres B., Ceballos J.L., Basantes R., Vuille M., Sicart J-E, Huggel C., Scheel M., Lejeune Y., Arnaud Y., Collet M., Condom T., Consoli

G., Favier V., Jomelli V., Galarraga R., Ginot P., Maisincho L., Mendoza J., Ménégozl M., Ramirez E., Ribstein P., Suarez W., Villacis M., Wagnon P. (2013), "Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change", *The Cryosphere*, 7: 81-102.

Winters C. (2012), "Impact of Climate Change on the Poor in Bolivia", *Global Majority E-Journal*, 3(1): 33-43.

Painter J., Ticehurst S., Urgel S., Best S. (2009), "Bolivia Climate change, poverty and adaptation", Technical Report, Oxfam International.

Vuille M., Kaser G., 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: 14-28.

Kaser G., Osmaston H. (2002), "Tropical Glaciers", Cambridge University Press, pp. 27.

Benn D.I., Lehmkuhl F. (2000), "Mass balance and equilibrium-line altitudes of glaciers in high-mountain environments", *Quaternary International*, 65: 15-29.

Meier M.F., Post A.S. (1962), "Recent variations in mass net budgets of glaciers in western North America", *International Association of Hydrological Sciences Publication*, 58: 63-77.

