



## **Monitoraggio 2018–2022 ghiacciaio Chacahcomani Cordigliera Real (Bolivia)**

### **-Report sintetico-**

Il ghiacciaio Chacahcomani è situato nella provincia di Larecaja del dipartimento di La Paz (Cordillera Real, Bolivia; 15.9 S, 69.3 W), a 70 km a nord da La Paz tra l'arido Altiplano a ovest e l'umido bacino Amazzonico a est.

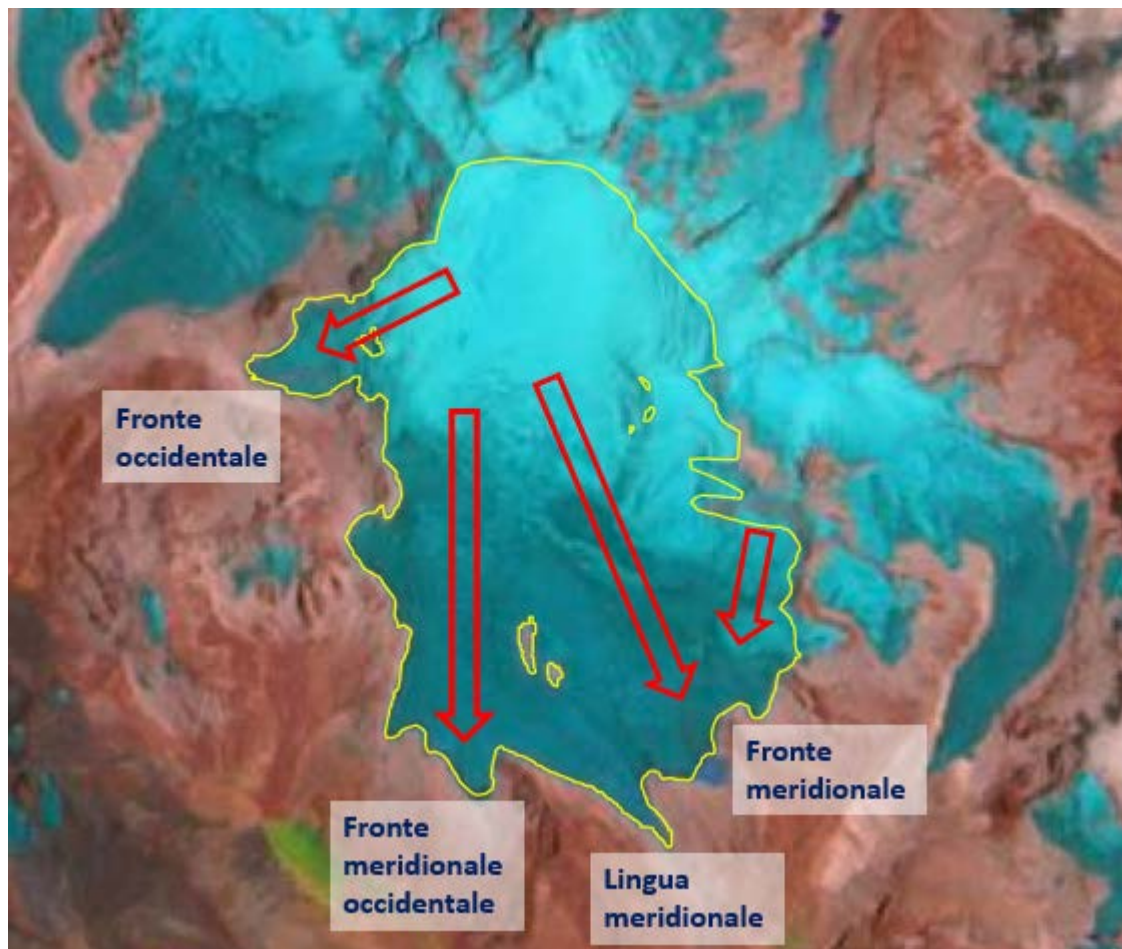
Il Chachacomani è un ghiacciaio di tipo altopiano con diverse lingue radiali (Fig.1), ha un'area 7,3 km<sup>2</sup> (2020), una lunghezza di 4,2 km e si estende per circa 1.140 metri di dislivello da quota 6074 m s.l.m a quota 4937 m s.l.m. (dati DEM ASTER 2011).

Il monitoraggio del ghiacciaio è iniziato a fine agosto 2018 con la posa di 12 paline ablatometriche (diventate 13 nel 2022), il sondaggio del bacino di accumulo, lo studio del manto nevoso e il rilievo con GPS in RTK mode nell'area di ablazione. Sono state inoltre marcate le stazioni fotografiche e quelle per le misure frontali.

Oltre alle misure dirette quantitative e qualitative completano il monitoraggio le analisi da telerilevamento satellitare indispensabili per lo studio delle dinamiche storiche ed attuali.

Da agosto 2018 a settembre 2022 sono state condotte 8 campagne di rilievi, per un numero complessivo di 19 giorni sul campo:

- 28/29/30 agosto 2018
- 1/2/3 dicembre 2018
- 11/12 aprile 2019
- 3/4 settembre 2019
- 5/6 settembre 2020
- 10 dicembre 2020
- 29/29/30 agosto – 1/2 settembre 2021
- 20/21 agosto 2022



*1 immagine a falsi colori Sentinel-2 del 17 novembre 2020. La linea gialla rappresenta l'estensione del ghiacciaio. Le frecce rosse indicano i flussi principali.*

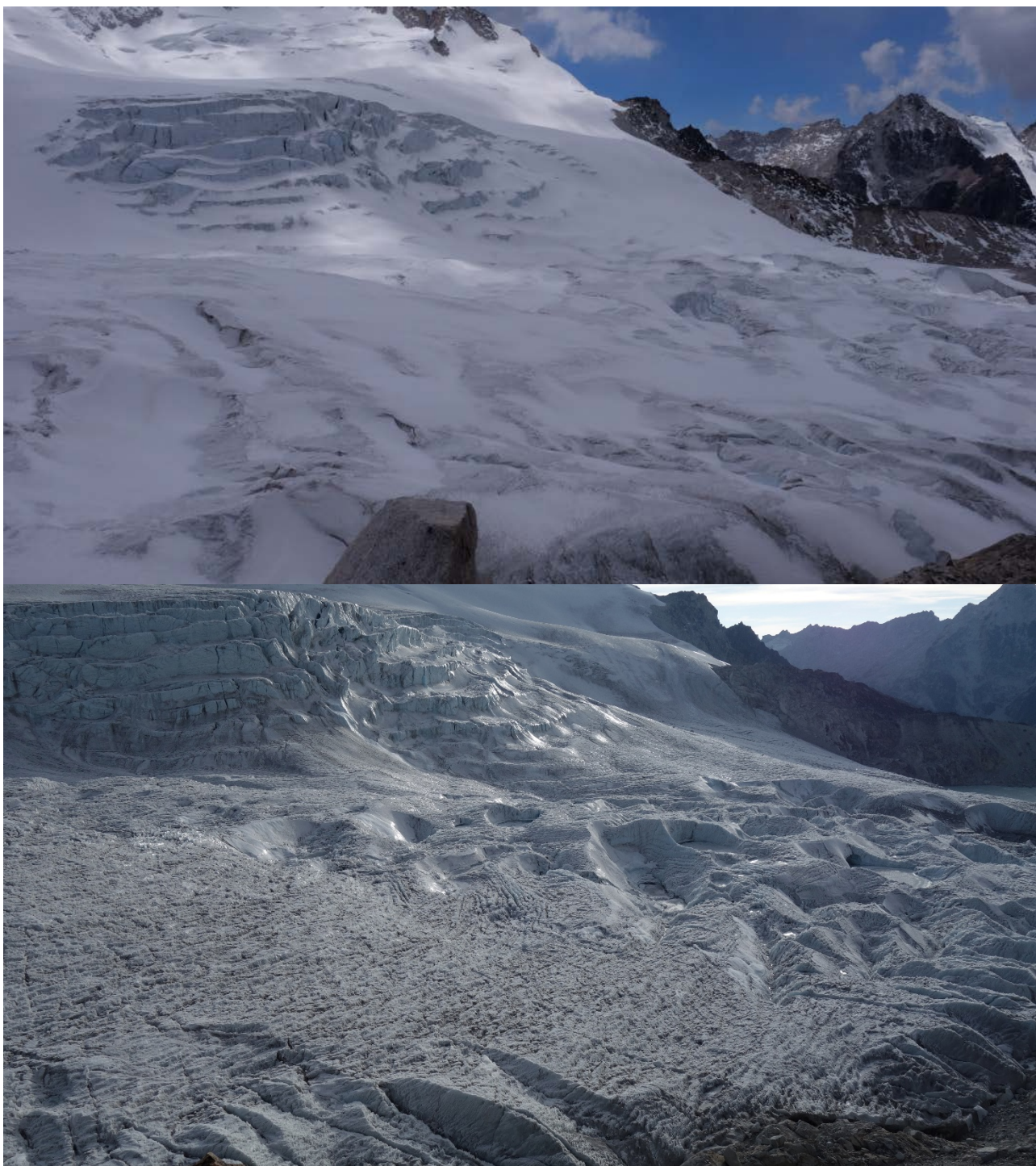
### **Rilievo fotografico**

Il rilievo fotografico rappresenta una tecnica di monitoraggio molto importante poiché permette di cogliere immediatamente a colpo d'occhio i cambiamenti che ha avuto un ghiacciaio tra uno scatto e l'altro. Ad esempio le fotografie scattate dalle stazioni fotografiche mostrano in modo molto forte la differenza dell'innevamento nella parte inferiore del ghiacciaio tra settembre 2018 e settembre 2020. Nel settembre 2018 il plateau inferiore del ghiacciaio era quasi completamente coperto da uno strato di neve variabile dai 5 ai 50 cm, 2 anni dopo quest'area si presentava completamente secca e caratterizzata dalla presenza di molti penitentes indicando processi di ablazione attivi e l'assenza di precipitazioni nevose corpose come quelle che hanno caratterizzato il 2018 (Fig.2-3).



*2 Confronto fotografico del plateau inferiore quota 5200 m. s.l.m. in alto settembre 2018 in basso settembre 2020, si nota la forte differenza di innevamento.*





3 Confronto fotografico del plateau inferiore quota 5200 m. s.l.m. in alto settembre 2018 (A.Galluccio) in basso settembre 2020, si nota la forte differenza di innevamento.

Il monitoraggio fotografico, oltre al plateau inferiore del ghiacciaio, interessa anche la fronte meridionale e la fronte meridionale occidentale (Fig.1). In entrambi i casi è evidente l'arretramento e la contrazione avvenuta in questi 4 anni (Fig.4-5).



A



B



C



4 Confronto fotografico della fronte meridionale occidentale, A in alto settembre 2018 (A.Galluccio), B al centro settembre 2020 (D.Vitale), C in basso settembre 2022 (R.Choque).

A



B



C



D



5 Confronto fotografico della lingua meridionale, A settembre 2018 (A.Galluccio), B settembre 2020, C settembre 2021, D agosto 2022.

Il confronto tra le immagini del ghiacciaio scattate a distanza di anni mette ben in evidenza anche la sempre maggiore emersione di banchi rocciosi che scaldandosi più del ghiaccio adiacente ne vanno ad aumentarne il tasso di fusione provocando ancora di più la loro emersione, un fenomeno che si auto amplifica (Fig.6).



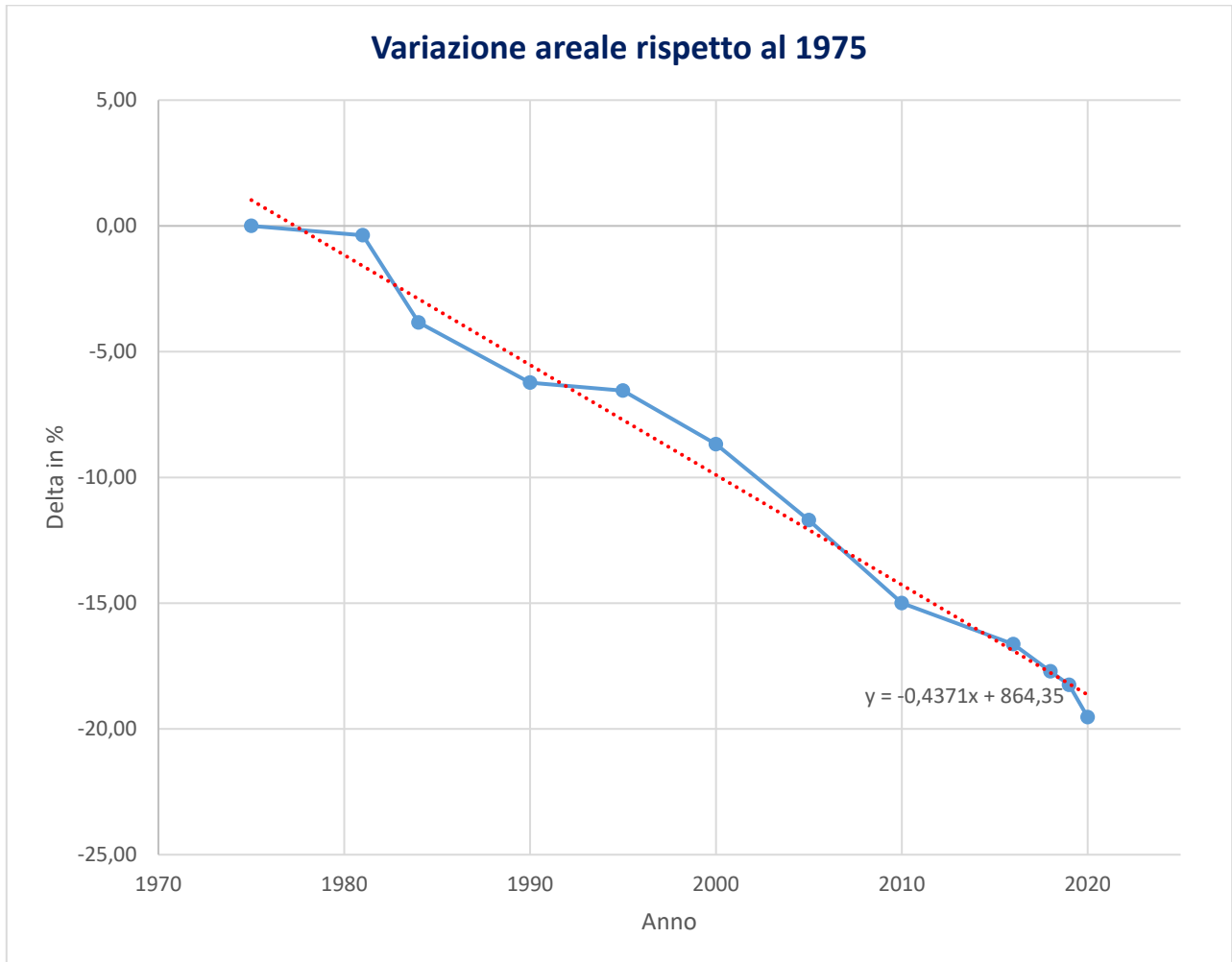


*6 Confronto fotografico della bastionata rocciosa che sta emergendo a ovest della seraccata sopra il primo plateau. In alto settembre 2018 (A.Galluccio) in basso settembre 2020.*



### Variazione areale e misure frontali

Tra il 2018 e il 2020 la mappatura da immagini satellitari del ghiacciaio ha evidenziato una contrazione areale di  $-1,65 \text{ km}^2$  ( $-2,2\%$ ), l'estensione è passata da  $7,46 \text{ km}^2$  nel 2018 a  $7,29 \text{ km}^2$  nel 2020, se andiamo ancora più indietro dal 1975 al 2020 l'area si è ridotta del 19,5%.



7 il grafico mostra la variazione areale del ghiacciaio espressa in percentuale rispetto all'estensione del 1975. La linea blu mostra la contrazione areale misurata da immagini satellitari dal 1975 al 2020. La linea tratteggiata rossa rappresenta la linea di tendenza.

La regressione più marcata del perimetro glaciale avvenuta negli ultimi 4 anni, circa 100 metri, si osserva dove si trovava la grossa dolina di crollo in prossimità della fronte meridionale. Oggi in seguito al completo collasso della dolina le sue pareti settentrionali sono diventate i nuovi margini del ghiacciaio (Fig.8-9-10).

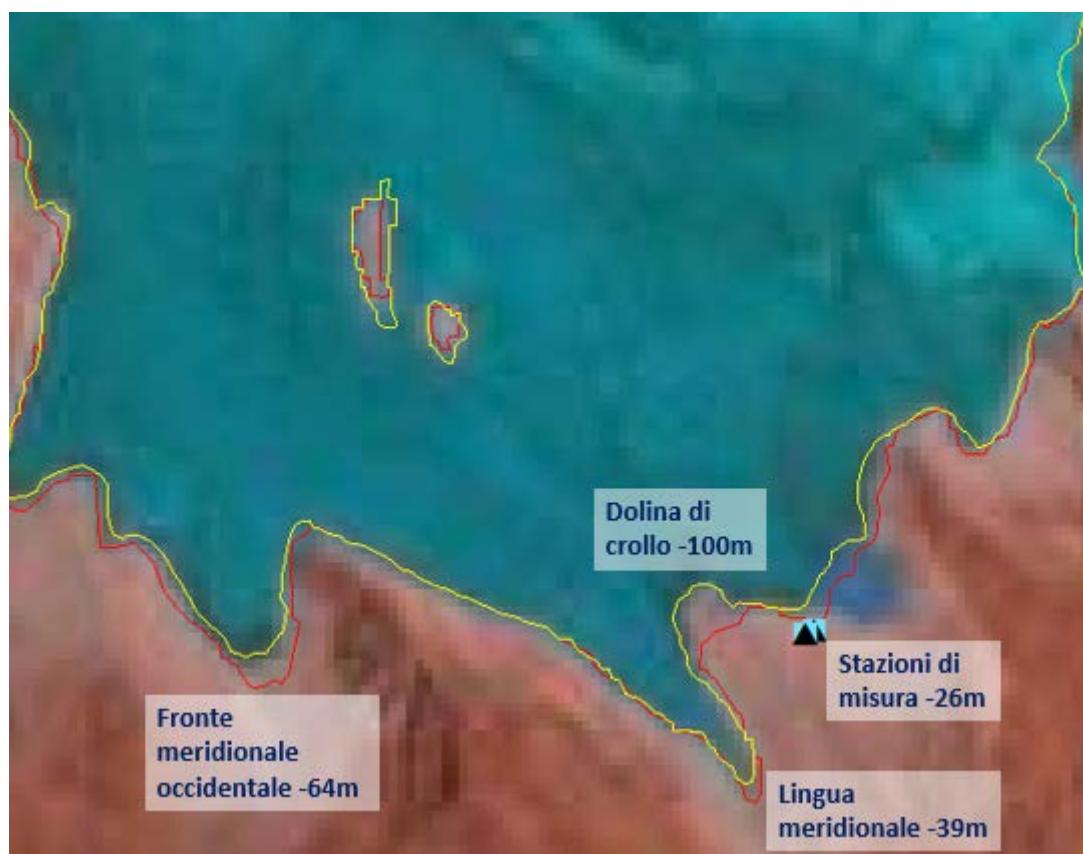


*8 Confronto fotografico della fronte meridionale del ghiacciaio ripresa dal campo base. Con il marker rosso è evidenziata la dolina di crollo. In alto settembre 2018 (A.Galluccio) in basso settembre 2020, il margine meridionale della dolina di crollo è ormai scomparso.*





9 Cavit  formata in seguito al collasso della dolina di crollo e alla fusione del suo margine meridionale. Immagine settembre 2020.



10 immagine a falsi colori Sentinel-2 del 17 novembre 2020. Regressioni frontali misurate in campagna e da satellite, la linea rossa mostra l'estensione del ghiacciaio nel 2018, quella gialla nel 2020.

Le misure frontali fatte a partire dalle stazioni di misura marcate nel 2018 indicano per la stazione n°1 un arretramento pari a 26,7 metri al 2020 che sale a 59, 2 metri complessivi al 2022 mentre per la stazione n°2 si misura un arretramento di 17,5 metri al 2020 e 28,7 metri al 2022 si nota quindi un aumento dei tassi di regressione negli ultimi 2 anni, processo confermato anche dallo studio dell'Indice AAR e dai dati di lettura delle paline ablatometriche.

Il continuo regresso del ghiacciaio sta portando di contro ad un'espansione de lago proglaciale posto sulla sua fronte meridionale. Il bacino è passato da 22293 m<sup>2</sup> nel novembre 2018 a 31373 m<sup>2</sup> nel novembre 2020 (+40%) occorrerà approfondire quanto dell'importante incremento osservato da satellite sia anche dovuto a fluttuazioni temporanee o stagionali del lago.

## ELA e indice AAR

Le misure puntuali date dalle paline ablatometriche vengono affiancate alla determinazione, tramite rilievi fotografici sul campo e elaborazione di immagini satellitari, della Equilibrium Line Altitude, la linea che separa la zona di accumulo di massa, da quella con perdita di massa. Per prassi si fa coincidere tale confine con la Snow Line stagionale, ossia il limite della neve residua alla fine della stagione di massima ablazione (novembre/dicembre). L'area che presenta ancora neve si definisce Accumulation Area (AA) rapportandola con quella totale del ghiacciaio si ottiene anche l'Accumulation Area Ratio (AAR), che è un utile indice per la stima del bilancio di massa.

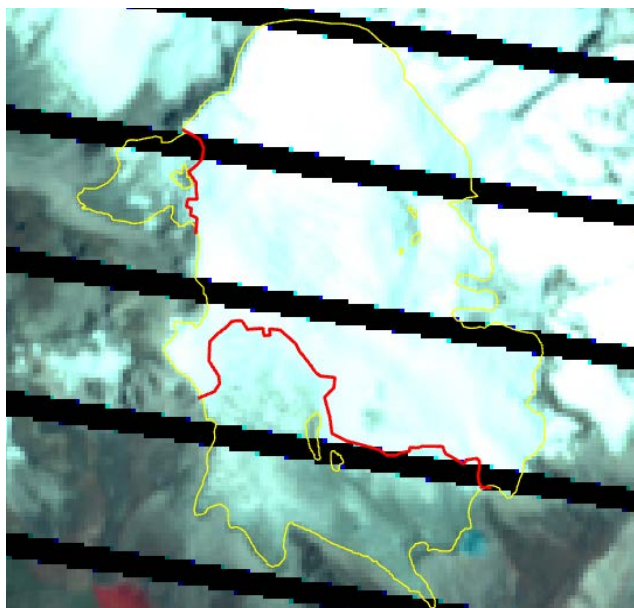
Stagione	Indice AAR
2015-2016	0,37
2016-2017	0,52
2017-2018	0,68
2018-2019	0,56
2019-2020	0,47
2020-2021	0,56
2021-2022	0,41

*Tabella 1: Valori dell'Indice AAR misurato da Immagini satellitari.*

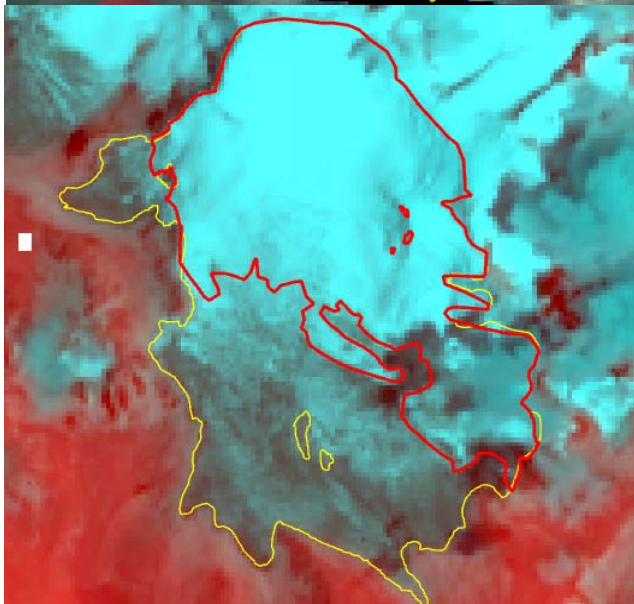
Ad esclusione della stagione 2017-2018, negli ultimi 7 anni la copertura nevosa residua al termine della stagione di massima ablazione è risultata al di sotto della quantità necessaria per assicurare bilanci di massa stabili per i ghiacciai tropicali circa il 70% pari ad un AAR di 0,7 (Tab. 1). Il valore più negativo si misura nel 2015-2016 anno in cui vi è stato un inteso fenomeno del El Niño.



05/12/2018



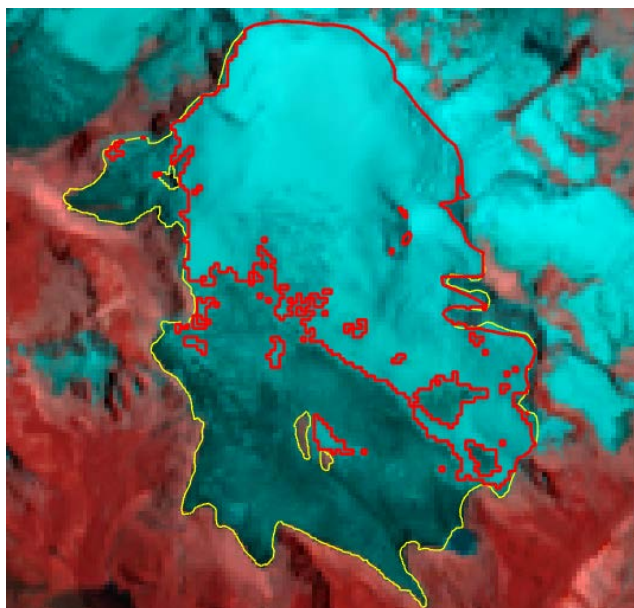
14/11/2019



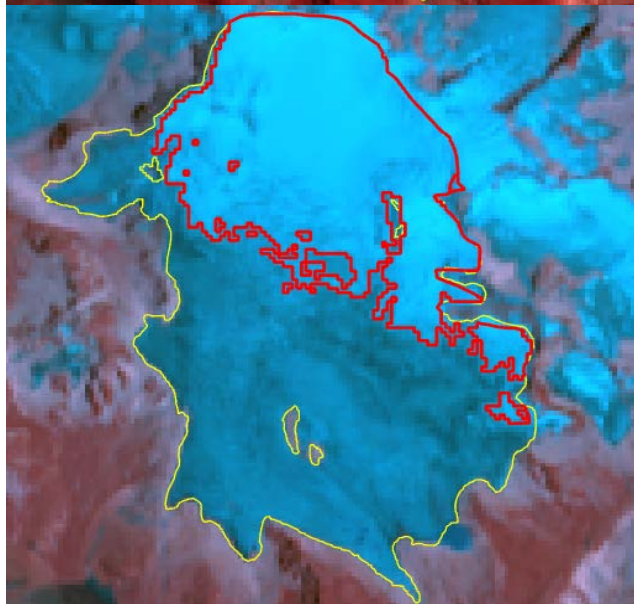
17/11/2020



26/10/2021



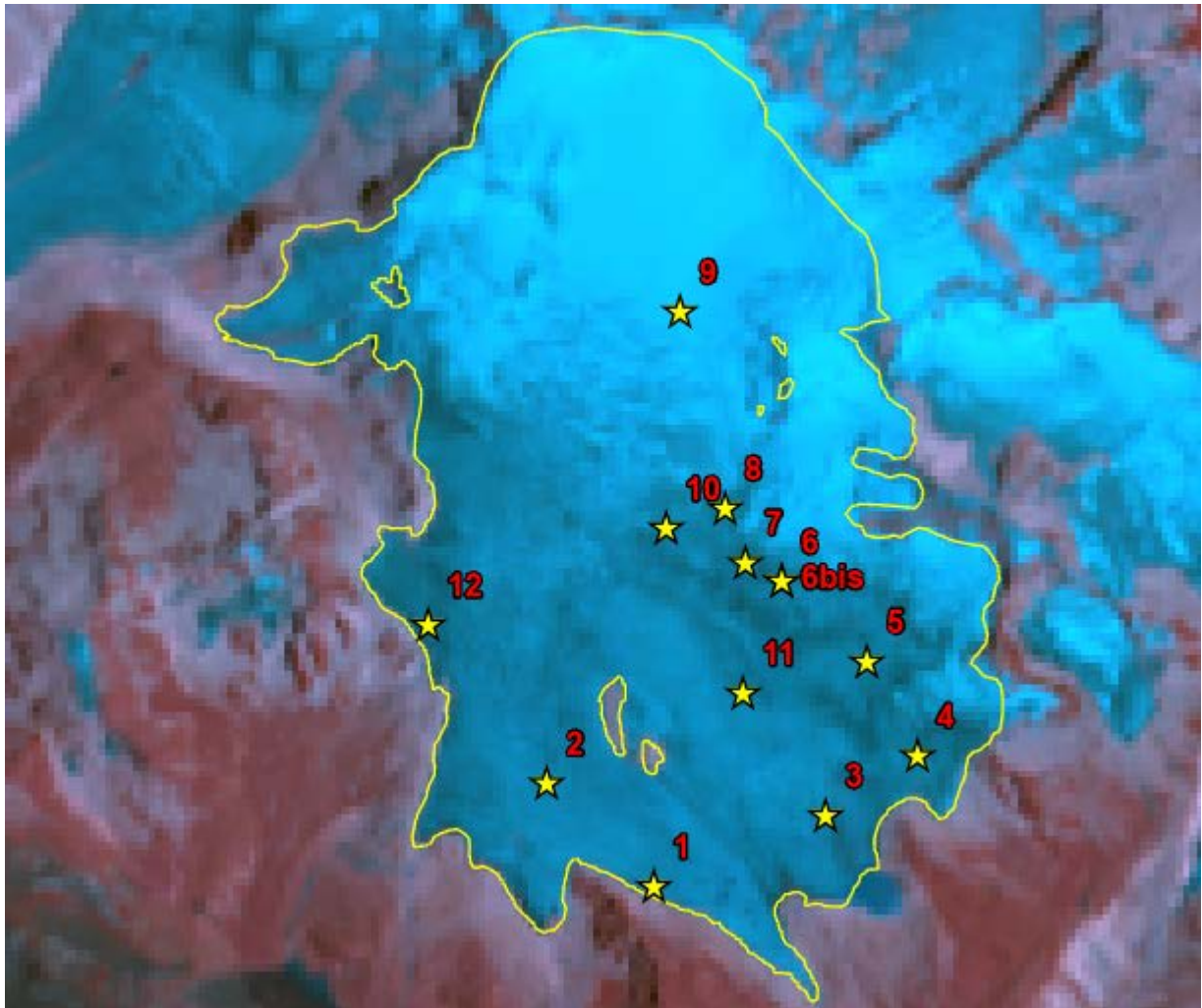
14/11/2022



*11Mappatura dell'innevamento residuo da immagini satellitari Landsat e Sentinel 2*

Il confronto dell'andamento dell'Indice AAR rispecchia molto bene i tassi fusione registrati dalle paline ablatometriche (Fig.12) indicando le stagioni 2019-2020 e 2021-2022 come le meno favorevoli alla conservazione del ghiacciaio. L'anno appena concluso è infatti stato caratterizzato da una stagione umida molto tardiva e corta, le prime precipitazioni consistenti sono arrivate solo a metà gennaio 2022, successivamente dai primi di aprile fino a metà settembre non c'è stata nessuna nevicata o precipitazione consistente.





*12 immagine a falsi colori Sentinel-2 del 14 novembre 2022. Posizione delle paline ablatometriche.*

### **Paline ablatometriche e stima del bilancio di massa 2018-2022**

La differenza tra 2 date della misura di emersione delle paline ablatometriche, indica lo spessore di neve/ghiaccio scomparso durante tale periodo.

La palina ablatometrica che ha registrato la perdita maggiore, pari a 14,4 metri w.eq. è la n° 1. Questa si trova sulla fronte meridionale principale del ghiacciaio a quota 5211 m. s.l.m. (Fig.12).

In data 10 dicembre 2020 è stata sostituita poiché quasi completamente fuoriuscita dalla superficie del ghiacciaio indicando una perdita pari a 12 metri (agosto 2018-dicembre 2020) che arriva a 15,6 metri nell'agosto 2022. La misura della profondità dell'ex dolina di crollo che si trovava vicino alla palina, ora una grossa falesia di ghiaccio, indica che il ghiacciaio in quest'area potrebbe avere uno spessore medio di circa 30 metri. Con il tasso di fusione osservato la parte più meridionale del ghiacciaio potrebbe scomparire nei prossimi 5/6 anni.

Se si confrontano i dati registrati dalle paline si deduce che le annate idrologiche con i tassi di fusione più marcati sono 2019-2020 e 2021-2022 ben concordando con i valori più bassi dell'Indice AAR, rispettivamente 0,47 e 0,41.

La palina n° 1 tra settembre 2018 e settembre 2019 ha registrato una perdita pari a 3,74 metri, tra settembre 2019 e settembre 2020 a 6,96 metri, tra settembre 2020 e settembre 2021 a 0,95 metri mentre tra settembre 2021 e agosto 2021 di 4,34 metri. La palina n° 2 tra settembre 2018 e settembre 2019 indica una perdita di 1,35 metri, tra settembre 2019 e settembre 2020 di 5,83 metri tra settembre 2020 e settembre 2021 di 0,97 metri, mentre tra settembre 2021 e agosto 2021 di 2,90 metri.

La palina n°4 trovandosi in prossimità della ELA teorica di equilibrio (demarca un'area di accumulo pari al 70% dell'intera area del ghiacciaio) può darci un'indicazione approssimativa sul bilancio di massa specifico. Tra settembre 2018 e settembre 2020 la palina indica una perdita di 40 cm di neve e 210 cm di ghiaccio, assumendo come densità del ghiaccio il valore medio di  $900 \text{ kg/m}^3$  e  $400 \text{ kg/m}^3$  come densità media della neve, corrispondono complessivamente -2,05 metri w.eq. Per le 2 successive stagioni da settembre 2020 ad agosto 2022 i metri in w.eq. persi sono -2,88. Complessivamente nei 4 anni di monitoraggio da settembre 2018 ad agosto 2022 si può stimare un bilancio di massa specifico pari a -4,93 metri w.eq. Il bilancio netto 2018-2022 può essere quindi stimato pari a  $-36777800 \text{ m}^3 \text{ w. eq.}$

Anche i dati misurati dalla palina n°4 concordano con quelli dell'Indice AAR le prime 2 stagioni 2018-2020 hanno complessivamente valori meno negativi (0,56-0,47) rispetto alle ultime 2 stagioni (0,56-0,41) nelle quali si stima il bilancio di massa più sfavorevole.