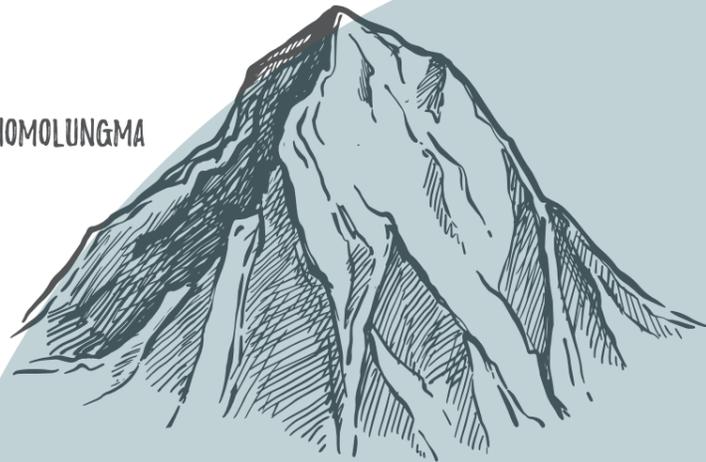


CHOMOLUNGMA



CHHOGORI



LHOTSE



KANGCHENJUNGA



CHO OYU



I ghiacciai si stanno riducendo in diverse aree del mondo e costituendo un'importante riserva idrica sono sotto l'attenta osservazione degli scienziati. La comparazione fotografica rappresenta una tecnica che permette di studiare le variazioni delle masse glaciali degli ultimi decenni. Le immagini prodotte durante il progetto "Sulle tracce dei ghiacciai" nel 2018 in tre aree glaciali dell'Himalaya centrale (gruppo del Kangchenjunga, dell'Everest e del Cho Oyu) sono state integrate con il rilevamento sul terreno e il telerilevamento da immagini LANDSAT 1989-1991 e 2000 e SENTINEL-2 2017. Dallo studio risulta un evidente regresso dei ghiacciai nelle tre aree esaminate (ghiacciai Kangchenjunga, Rongbuk e Gyabrag) con l'interruzione di diverse lingue un tempo confluenti. Risulta aumentato il numero dei laghi sopragliaciali. La formazione di laghi di grandi dimensioni ha favorito processi di retroazione nonché il regresso delle fronti ancora attive alimentate dal flusso glaciale. Le osservazioni sul terreno mostrano, per i tre ghiacciai, delle riduzioni di lunghezza, anche chilometriche, e di spessore (sino a centinaia di metri) rispetto al massimo della Piccola Età Glaciale. Dall'analisi delle immagini satellitari emerge una riduzione areale per le tre aree considerate fra il 3 e il 4% nell'ultimo trentennio.

LO STATO DEI GHIACCIAI HIMALAYANI:

*confronti fotografici,
rilevamento e
telerilevamento
per uno studio
tra Nepal e Tibet*

a cura di

Andrea Bollati, Fabiano Ventura, Claudio Smiraglia, Guglielmina Diolaiuti, Davide Fugazza, Roberto Sergio Azzoni



Autori Andrea Bollati

Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Scienze, Sez. di Scienze Geologiche.
Società Geologica Italiana, Sezione Geologia Himalayana.

Fabiano Ventura

Associazione no profit Macromicro

Claudio Smiraglia

già Università Statale di Milano - Comitato Glaciologico Italiano

Guglielmina Diolaiuti, Davide Fugazza, Roberto Sergio Azzoni

Università Statale di Milano, Dipartimento di Scienze e Politiche per l'Ambiente

LO STATO DEI GHIACCIAI HIMALAYANI:

confronti fotografici, rilevamento e telerilevamento per uno studio tra Nepal e Tibet

INTRODUZIONE

I ghiacciai della Terra possono essere considerati dei veri e propri indicatori del cambiamento climatico, infatti con l'attuale fase di riscaldamento climatico (dall'era preindustriale la temperatura media globale è aumentata di circa 1°C; dati IPCC, 2019) stiamo assistendo ad un'intensa riduzione areale e volumetrica delle masse glaciali su quasi tutto il nostro pianeta. In diverse aree del mondo i ghiacciai costituiscono un'importante riserva idrica per uso irriguo, per l'energia idroelettrica, per uso potabile e industriale e il loro studio risulta quindi di grande interesse pratico e applicativo.

In questo contesto s'inserisce il progetto "Sulle tracce dei ghiacciai", ideato e sviluppato dal fotografo Fabiano Ventura, che utilizza la tecnica della comparazione fotografica per testimoniare le variazioni delle masse glaciali negli ultimi 100 anni e oltre, legate agli effetti dei cambiamenti climatici (www.sulletraccedei ghiacciai.com).

Il confronto fotografico, utilizzato dai glaciologi italiani sin dagli inizi del '900 (Baroni et al., 2017), è uno strumento che coniuga la forza comunicativa delle immagini con il rigore della ricerca storica e scientifica. Le immagini prodotte durante il progetto testimoniano di fatto l'arretramento dei più grandi ghiacciai montani della Terra e insieme ai dati scientifici rilevati, forniscono un'idea immediata del riscaldamento globale in atto confermando quanto siano urgenti tutte le possibili azioni per contrastarlo. Le cinque spedizioni svolte nell'arco di un decennio in Karakorum, Caucaso, Alaska, Ande, Himalaya e sulle Alpi hanno consentito la produzione di riprese fotografiche identiche (per posizione e periodo dell'anno), rispetto a quelle realizzate dai primi fotografi ed esploratori di fine '800 e inizio '900.

Sul terreno vengono utilizzati apparecchi fotografici di grande formato a pellicola (Smiraglia et al., 2019) che garantiscono un'alta risoluzione e una distorsione simile a quella delle fotografie storiche, in modo che si ottengano immagini sovrapponibili.

Il progetto "Sulle tracce dei ghiacciai" si avvale della collaborazione e del supporto di un Comitato Scientifico internazionale presieduto dal Professor Claudio Smiraglia (già Università degli Studi di Milano), che ha coordinato le campagne di rilevamento e le analisi di telerilevamento nelle aree campione, dalle quali è derivato un supporto quantitativo ai confronti fotografici.



I tre ghiacciai visitati

Keywords

- riduzione dei ghiacciai
- riscaldamento globale
- progetto "Sulle tracce dei ghiacciai"
- repeat photography
- remote sensing
- laghi sopraglaciali
- Glacier Lake Outburst Flood
- Himalaya centrale

Nella primavera del 2018 il progetto "Sulle Tracce dei Ghiacciai" ha raggiunto tre aree glaciali dell'Himalaya centrale, in Nepal (gruppo del Kangchenjunga) e in Cina (gruppo dell'Everest e del Cho Oyu) (carta generale in Fig.1); all'attività di ripetizione fotografica (repeat photography) si è affiancata un'attività di rilevamento condotta sul terreno dal Dott. Andrea Bollati (Università degli Studi Roma Tre) e di telerilevamento, coordinata dai Proff. Claudio Smiraglia e Guglielmina Diolaiuti con la collaborazione dei Dott. Roberto Sergio Azzoni e Davide Fugazza (dell'Università Statale di Milano).

I ghiacciai visitati si trovano nella regione montuosa denominata Himalaya-Karakorum (HK), una delle più importanti regioni glaciali della Terra oltre le calotte polari (Aazam et al., 2018), e costituiscono un'importante riserva idrica dei maggiori bacini fluviali del subcontinente indiano, quali l'Indo, il Gange e il Brahmaputra, le cui acque sono utilizzate da oltre 750 milioni di persone (Immerzeel, 2010; Prithchard, 2017).

La crescente riduzione areale e volumetrica dei ghiacciai himalayani di questi ultimi decenni, che registra una lieve accelerazione negli ultimi anni (Ren et al., 2006; Bolch et al., 2008; Salerno et al., 2008; Racoviteanu et al., 2015; Brahmabhatt et al., 2014; Kraaijenbrink et al., 2017; Dehecq et al., 2019) è un fenomeno variabile nelle diverse aree dell'HK (Fujita, Nuimura, 2011; Bolch et al., 2012; Gardelle et al., 2013), pertanto oggi è

sempre più diffuso l'utilizzo di tecniche di telerilevamento che favoriscono il miglioramento delle stime di variazione areale di queste masse glaciali.

Nell'ambito della spedizione, le analisi di telerilevamento (remote sensing) sono state realizzate sui tre apparati glaciali oggetto dei confronti fotografici e dei rilievi di terreno: il Kangchenjunga in Nepal sul versante Nord del Monte Kangchenjunga, il Rongbuk sul versante Nord dell'Everest e il Gyarag o Gyabrag sul versante Nord del Cho Oyu, in Cina.

Allo scopo di individuare eventuali modificazioni geometriche recenti degli apparati glaciali sono state utilizzate immagini LANDSAT 1989-1991 e 2000 e SENTINEL-2 2017 (Smiraglia et al., 2019).

I perimetri dei ghiacciai (individuati utilizzando il database GLIMS Global Land Ice Measurements from Space, <http://glims.colorado.edu/glacierdata/>) sono stati delineati manualmente in ambiente GIS per ogni periodo di riferimento utilizzando le immagini satellitari come base.

Durante la spedizione, il lavoro sul campo ha previsto osservazioni sulla localizzazione ed evoluzione delle fronti glaciali, sulla presenza di laghi sopraglaciali e sulle caratteristiche del detrito morenico superficiale (estensione, spessore e natura litologica). La geometria delle fronti è stata tracciata con l'utilizzo di un GPS portatile cartografico con caratteristiche opportune.



Il Ghiacciaio Kangchenjunga

Il Ghiacciaio Kangchenjunga (Fig.2) si trova sul versante settentrionale del Monte Kangchenjunga (Nepal nordorientale), la terza montagna più elevata della Terra (8586 m).

Geologicamente quest'area si trova nella zona denominata High Himalaya (o Higher Himalayan Crystallines, HHC), in corrispondenza dell'unità tettonica nota come Greater Himalayan sequence (GHS) costituita da rocce metamorfiche di medio e alto grado (prevalentemente gneiss e subordinati micascisti), migmatiti e intrusioni leucogranitiche del Miocene che caratterizzano le vette più elevate (Searle et al., 2005), dal Kangchenjunga allo Jannu.

La prima carta dell'area con la rappresentazione del ghiacciaio (Sketch map of the glacier of Kangchenjunga, in Freshfield, 1903), venne realizzata nel 1899 dal geologo E. J. Garwood durante la spedizione (guidata dal britannico Douglas W. Freshfield) che per prima realizzò il periplo del Kangchenjunga, inoltrandosi in aree inesplorate e superando passi a oltre 6000 metri di altezza. Garwood durante lo stesso avventuroso viaggio, produsse anche la prima carta fornita di note geologiche (Material for a geological Map of Sikkim, in Freshfield, 1903). Faceva parte della spedizione Vittorio Sella, il noto fotografo e alpinista di Biella e nipote di Quintino Sella (fondatore del Club Alpino Italiano) che realizzò, tra la fine dell'800 e l'inizio del '900, campagne fotografiche anche sulle montagne del Caucaso (in Georgia), dell'Alaska (nell'area del Monte S. Elia), dell'Africa (sul Ruwenzori) e del Karakorum (nell'area del K2).

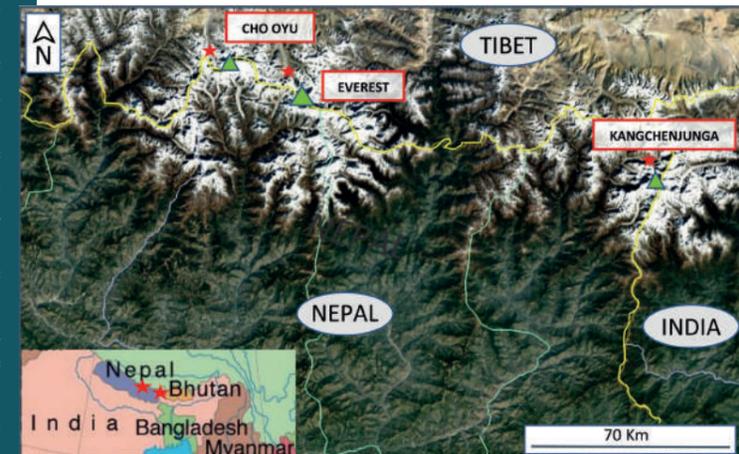


Fig. 1 Ubicazione dei ghiacciai esaminati (elaborazione di A. Bollati).



Fig. 2 Il Ghiacciaio Kangchenjunga, visto dai pressi del campo base (5135 m, località Pang Pema), confronto tra il 1899 (foto V. Sella - © Fondazione Sella Onlus) e il 2018 (foto F. Ventura - © Archivio F. Ventura). Si evidenzia la notevole riduzione di spessore del ghiacciaio.

Dal punto di vista glaciologico, l'area del Kangchenjunga risulta meno studiata rispetto ad altre aree dell'Himalaya, dove la logistica e l'accesso sono più facili; per raggiungere il Kangchenjunga bisogna infatti percorrere lunghi e faticosi itinerari, anche se tra i più suggestivi dell'intera area himalayana. Il percorso scelto nel 2018 ha previsto la partenza da Taplejung, 10 giorni di trekking per 7000 m di dislivello in salita e 3500 in discesa, 110 Km di percorso (lungo le valli dei fiumi Tamor Nadi e Ghunsa Kola), per arrivare al campo base Nord del Kangchenjunga a quota 5135 m.

Le osservazioni sul campo nell'area del Ghiacciaio Kangchenjunga hanno constatato la presenza di un'ampia copertura detritica nella zona di ablazione (Fig. 3), la quale rende più complessa e variabile l'influenza dei cambiamenti climatici su questo tipo di ghiacciaio. Infatti, in funzione dello spessore e della granulometria del detrito, essa può ridurre (se la copertura è completa e con spessore di alcuni decimetri di clasti grossolani) o favorire la fusione (se la granulometria è fine e con copertura parziale) (Nicholson et al., 2018). Inoltre, si registra la presenza di depressioni di grandezza variabile colme di acqua di fusione, il cui numero negli ultimi decenni è aumentato.

Osservazioni sono state dedicate anche ai laghi sopragliaciali (che colmano depressioni di varia estensione), la cui presenza e la cui evoluzione sono indicatori importanti delle condizioni dei ghiacciai. L'incremento del loro numero è infatti un chiaro indice del prevalere della fusione, e quindi della perdita di massa. Come già osservato da Pelto (2015), confrontando immagini Landsat 1991-2015, negli ultimi decenni il numero dei laghi sopragliaciali è sensibilmente aumentato.

Dall'analisi multitemporale del Ghiacciaio Kangchenjunga, frutto dell'elaborazione di tre immagini satellitari (LANDSAT 1991, LANDSAT 2000, SENTINEL-2 2017), risulta che l'area complessiva è passata da 94,62 km² nel 1991 a 91,43 km² nel 2017 con una perdita media annua di 0,12 km²; inoltre è stata registrata una lieve accelerazione del regresso nel periodo 2000-2017 (Smiraglia et al., 2019). Bisogna comunque considerare che la stima di un'area glaciale è più incerta dove i ghiacciai sono caratterizzati da un'estesa copertura detritica e dalla presenza di vasti settori in cui il ghiaccio è stagnante (Paul et al., 2004).

L'analisi delle immagini satellitari e i rilievi di terreno hanno individuato inoltre i limiti dell'espansione della Piccola Età Glaciale (PEG), databile in Himalaya fra il 1300 e il 1600 (Rowan, 2017), qui testimoniata da imponenti morene laterali e latero-frontali.

Il regresso della lingua del Kangchenjunga dall'epoca della PEG si può stimare in circa 3 km alla fronte attiva, il cui limite, attualmente a quota 4600 m, è stato tracciato mediante GPS.

Nell'area del Ghiacciaio del Kangchenjunga sono stati realizzati cinque confronti fotografici, che lo ritraggono lungo il versante Nord dell'omonimo monte, nella sua porzione mediana e alla confluenza con il ghiacciaio Ramthang; un sesto confronto fotografico interessa il ghiacciaio Jannu che scende dal versante nord dell'omonimo monte, sito pochi chilometri più a ovest del Kangchenjunga (Fig. 4). Le fotografie d'epoca risalgono al 1899 (quelle di Vittorio Sella) e al 1930 (di Ulrich Wieland e F. S. Smythe, che parteciparono alla spedizione guidata da Günter O. Dyhrenfurth) (Dyhrenfurth, 1954), provenienti rispettivamente dall'archivio della Fondazione Sella di Biella e dall'archivio dell'Alpin Club di Londra.



Fig. 3 Il Ghiacciaio Kangchenjunga, in corrispondenza del Wedge Peak (o Chang Himal, 6800 m), mostra l'estesa copertura detritica che lo caratterizza (foto di A. Bollati, 2018).



Fig. 4 Il versante Nord dello Jannu (7710 m) e il suo ghiacciaio omonimo al centro, confronto tra il 1899 (foto V. Sella - © Fondazione Sella Onlus) e il 2018 (foto F. Ventura - © Archivio F. Ventura). A sinistra la valle del Ghiacciaio Kangchenjunga. Il confronto mostra l'evidente riduzione di spessore e l'arretramento della fronte subiti nel corso di quasi 120 anni.

Il Ghiacciaio Rongbuk

Il Ghiacciaio Rongbuk è situato sul versante Nord, tibetano, dell'Everest, la montagna più alta della Terra (8848 m).

Dal punto di vista geologico l'area dell'Everest e del vicino Cho Oyu sono comprese tra la zona dell'HHC e dell'unità

tettonica della GHS e la soprastante Tibetan sedimentary sequence (TSS), separate dal South Tibetan Detachment System (STDS) (Carosi et al., 2018). In particolare, sul versante Nord dell'Everest è ben esposta la sequenza di Formazioni che si succedono dal basso verso l'alto (la prima appartenente alla GHS, la seconda e la terza alla TSS): la Rongbuk Formation (costituita da rocce metamorfiche di alto grado, prevalentemente gneiss, interessate da intrusioni leucogranitiche mioceniche), la North Col Formation (costituita da rocce metamorfiche di basso grado, prevalentemente filladi, scisti e quarziti e verso l'alto dai calcari cristallini della nota "Yellow Band") e la Mt Jolmo Lungma Formation (costituita da calcari ordoviciani) (Carosi et al., 1999). Le tre formazioni indicate sono separate da due faglie normali, a basso angolo, denominate "Qomolangma detachment" la superiore, e "Lhotse detachment" l'inferiore (Searle et al., 2003), appartenenti al STDS (Carosi et al., 1999). Una prima carta dell'area dell'Everest, con notazioni geologiche di Noel Ewart Odell, fu pubblicata nel 1925 dalla London Royal Geographical Society (Wheeler, 1925), e realizzata in base ai rilievi eseguiti durante le spedizioni britanniche del 1921 e 1924. Durante queste furono compiute le prime esplorazioni dell'area, e i primi importanti tentativi di salita alla vetta (di George H. L. Mallory e compagni) dal versante Nord, quello tibetano,



Fig. 5
Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Rongbuk in un confronto fra la foto di B. Beetham del 1924 (© Royal Geographical Society) e Fabiano Ventura, 2018 (© Archivio F. Ventura). Si evidenzia la riduzione di spessore e di larghezza del ghiacciaio, come indicato anche dalla trim line (linea che segna il limite superiore raggiunto da un ghiacciaio in passato) presente alla base del Guangming Peak, al centro delle immagini.

perché a quei tempi il Nepal era interdetto agli stranieri e dunque anche il versante Sud dell'Everest. Risalgono proprio alle spedizioni suddette alcuni scatti ripetuti durante la spedizione del 2018 (Fig.5).

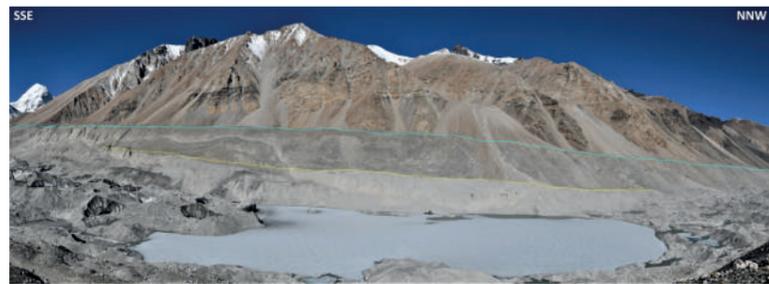


Fig. 6
Il Lago Rongbuk (lungo un chilometro e largo 500 m). Sul versante in sinistra orografica sono ben visibili le trim line della PEG (linea gialla) e dell'Olocene Superiore (linea celeste) (foto di A. Bollati, 2018).

Il Ghiacciaio Rongbuk è stato oggetto negli ultimi decenni di

numerosi studi, favoriti anche dalla facilità con cui si giunge nei pressi del campo base Nord, che si trova proprio alla base della fronte del ghiacciaio (a quota 5160 m). Tra gli studi più interessanti, anche dal punto di vista applicativo, vi sono quelli dedicati alla pericolosità dei laghi sopraglaciali (Nie et al., 2013; Chen et al., 2014), tra i rischi naturali più comuni in HK (Grabs et al., 1993; Bajracharya et al., 2007).

Questo ghiacciaio, come il Kangchenjunga, può essere definito un debris covered glacier per l'ampia copertura detritica che presenta uno spessore prevalentemente centimetrico o pluridecimetrico interessante la lingua di ablazione (Mortara et al., 2005), con le morfologie della fase iniziale dello stadio di maturità del glacier karst (caratterizzato da ghiaccio stagnante e coni detritici), con numerose cavità colme di acqua di fusione (Smiraglia et al., 2019).

Sia questo ghiacciaio che il Rongbuk orientale sono stati analizzati attraverso le tre serie di immagini satellitari già citate, e per la sua delimitazione si è fatto riferimento alla cartografia GLIMS e a King et al. (2017). L'area glaciale complessiva è passata da 102,78 km² nel 1989 a 99,17 km² nel 2017 con una riduzione di 3,61 km², corrispondenti a una perdita media annua di 0,13 km², evidenziata da uno restringimento delle lingue glaciali e da ampliamenti di affioramenti rocciosi nei bacini collettori (Smiraglia et al., 2019). Anche per il Rongbuk si osserva una lieve accelerazione della riduzione fra i due periodi

considerati (1989-2000 e 2000-2017).

La vasta conca sopraglaciale del Lago Rongbuk (Fig. 6) che caratterizza il settore inferiore della lingua coperta da detrito, la cui superficie raggiunge attualmente circa il mezzo chilometro quadrato, alla fine degli Anni Ottanta

non esisteva e considerando che negli ultimi anni l'incremento della superficie del lago sta accelerando, in accordo con studi recenti (Chen et al., 2014), il Lago del Rongbuk può essere ritenuto uno dei laghi potenzialmente più pericolosi per quanto riguarda i Glacier Lake Outburst Flood (GLOF); le inondazioni si innescano nel caso in cui un bacino cresca al tal punto da produrre il cedimento improvviso della diga naturale che lo contiene, con conseguente grande rischio per le popolazioni presenti a valle, alpinisti e trekker. Negli ultimi decenni il riscaldamento globale ha determinato l'aumento di questo rischio in tutta la regione HK (Bajracharya S. R. et al., 2009; Sanjay et al., 2012).

Nell'area del ghiacciaio del Rongbuk centrale sono stati realizzati sette confronti fotografici, che lo ritraggono nella sua porzione frontale, mediana e alla confluenza con il Rongbuk occidentale.

Le fotografie d'epoca risalgono al 1921 (di E.O. Wheeler), al 1922 (di C. J. Morris) e al 1924 (di B. Beetham), provenienti dall'archivio della Royal Geographical Society.

Altri confronti fotografici considerati non sono stati possibili nell'area del Rongbuk occidentale e dell'orientale per la notevole trasformazione del paesaggio avvenuta nel corso di un secolo, che ha reso molto difficile il raggiungimento dei presunti luoghi degli scatti d'epoca.



Il Ghiacciaio Gyabrag

Il Ghiacciaio Gyabrag o Gyarag (o Kyetrak), si trova sul versante cinese della sesta montagna più alta della Terra, il Cho Oyu (8201 m).

Le ricerche scientifiche sul Gyabrag sono meno numerose rispetto al Rongbuk, anche se il ghiacciaio rientra nell'area dell'Everest ed è facilmente raggiungibile dalla National Highway 318; tra le ricerche recenti è da segnalare lo studio di King et al. (2017) sull'evoluzione del Gyabrag tra il 2000 e il 2015.

Come per i precedenti, anche questo ghiacciaio è stato analizzato attraverso le tre serie di immagini satellitari già indicate, come per la cartografia utilizzata per la sua delimitazione.

Nel corso del XX secolo il Ghiacciaio Gyabrag ha subito una importante riduzione di spessore, come mostra il confronto tra le foto degli Anni Venti e quelle del 2018 (Fig. 7), con ampie aree completamente coperte di detrito.



Fig. 7
Il settore inferiore della lingua del Ghiacciaio Gyabrag nel 1921 (foto E. O. Wheeler - ©Royal Geographical Society) e nel 2018 (foto F. Ventura - © Archivio F. Ventura), dalla cima di un rilievo a quota 5700 m.

Per quanto riguarda le variazioni recenti l'area complessiva è passata da 54,43 km² nel 1989 a 52,32 km² nel 2017 con una riduzione di 2,11 km², corrispondenti a una perdita media annua di 0,08 km² (Smiraglia et al., 2019).

Nel settore principale del Gyabrag le riduzioni areali, mostrate da restringimenti delle lingue glaciali e da affioramenti rocciosi maggiormente esposti, sono passate da 0,05 km² annui nel periodo 1989-2000 a 0,09 km² annui nel periodo 2000-2017, registrando come per i precedenti ghiacciai un'accelerazione nella riduzione fra i due periodi considerati.

Durante il lavoro di terreno è stata tracciata la fronte che si presume attiva posta a quota 5130 m (e dalla quale fuoriesce il torrente subglaciale), a monte del grande lago proglaciale sito a circa 5100 m di quota.

A monte della fronte il ghiacciaio si presenta con copertura detritica quasi completa, caratterizzato dalla presenza di una serie di grandi pareti di ghiaccio, con altezze superiori ai 10 m. Più a monte la copertura detritica tende a diminuire e a concentrarsi nelle due morene superficiali. A valle della fronte attiva, il ghiacciaio si presenta stagnante e caratterizzato dalla tipica morfologia della fase terminale dell'evoluzione dei ghiacciai coperti da detrito, con alternanza di coni e depressioni con estesa copertura detritica, ridotta energia di rilievo, limitato ghiaccio e modesta presenza di cavità riempite da acqua di fusione.

Nelle foto degli Anni Venti il lago proglaciale non era presente e la lingua del ghiacciaio era più ampia in larghezza e spessore e meno coperta da detrito (Fig.7); inoltre, la fronte attiva arrivava più a valle di circa 5 Km chilometri rispetto all'attuale.

I confronti fotografici realizzati nel 2018 hanno considerato alcuni scatti (di E. O. Wheeler) risalenti alla spedizione britannica del 1921 durante la quale, per cercare la via migliore all'Everest, venne esplorato il versante nord del Cho Oyu.

CONCLUSIONI

La spedizione tra Nepal e Tibet del 2018, nell'ambito del progetto "Sulle tracce dei ghiacciai" ha permesso, attraverso i confronti fotografici realizzati e l'elaborazione dei dati tratti dalle immagini da satellite e di terreno, di documentare l'evidente fase di regresso dei ghiacciai nelle tre aree esaminate (i ghiacciai Kangchenjunga, Rongbuk e Gyabrag).

Il confronto fra le immagini storiche di fine XIX e dei primi decenni del XX secolo con quelle attuali mostra arretramenti delle fronti, in particolare riduzioni di spessore, che hanno profondamente modificato il paesaggio di queste aree. Anche il confronto tra la cartografia storica e recente mostra, insieme alle osservazioni sul terreno, l'interruzione di diverse lingue un tempo confluenti (le più importanti quella del Ghiacciaio Ramthang dal Kangchenjunga, quella del Rongbuk Orientale dal Rongbuk e quella del Gyabrag Orientale dal Gyabrag).

In generale, in ogni area glaciale esaminata si osserva l'aumento del numero dei laghi sopragliaciali con la formazione di laghi di grandi dimensioni che hanno favorito intensi processi di retroazione (con accelerazione del ritiro), nonché il regresso delle fronti ancora attive alimentate dal flusso glaciale.

Le osservazioni sul terreno mostrano, per i tre ghiacciai, delle riduzioni di lunghezza, anche chilometriche, e di spessore (sino a centinaia di metri) rispetto al massimo della Piccola Età Glaciale.

Considerando un periodo di circa un trentennio (1989-1991; 2000; 2017), dall'analisi delle immagini satellitari emerge una limitata riduzione areale simile per le tre aree considerate (fra il 3 e il 4%) e una lieve accelerazione della riduzione areale fra i due periodi considerati.

Il regresso glaciale in queste regioni dell'HK può essere attribuito a un incremento delle temperature medie annue, a una riduzione delle precipitazioni durante il monzone (Salerno et al., 2015; REN et al., 2017; Shresta et al., 1999; Bollasina et al., 2011) e a una diminuzione delle precipitazioni nevose in Himalaya nord-occidentale (Bhutiya et al., 2010).

Riguardo le prospettive future, la conferenza sul clima di Parigi del 2015 (COP21) ha indicato la necessità di contenere il riscaldamento globale in 1,5 °C entro la fine di questo secolo, intento ambizioso considerando il continuo aumento della concentrazione di CO₂ in atmosfera, già previsto da Le Quéré C. et al. (2018), e della temperatura media sul Pianeta degli ultimi anni (Sánchez-Lugo et al., 2018); anche se tale obiettivo fosse raggiunto nella regione dell'HK le temperature potrebbero superare comunque la suddetta soglia (Krishna et al., 2019) con la conseguente accelerazione della riduzione volumetrica e areale dei ghiacciai e la scomparsa di circa il 35% della massa glaciale (Kraaijenbrink et al. 2017); tutto ciò modificherà la distribuzione temporale e l'entità delle acque di fusione (con grave ricaduta per l'approvvigionamento idrico per uso civile e industriale che riguarda centinaia di milioni di persone), con l'espansione dei laghi glaciali e il conseguente aumento del rischio (GLOF) per le popolazioni locali.

Nota

Tutti i confronti fotografici e i dati sono stati raccolti ed elaborati nell'ambito del progetto "Sulle tracce dei ghiacciai" (<http://sulletraccedei ghiacciai.com>), in particolare durante la quinta spedizione "Himalaya 2018". Per le fotografie storiche si ringraziano la Fondazione Sella Onlus di Biella e la Royal Geographical Society di Londra.

BIBLIOGRAFIA

- Bezzi A., & Happs J.C. (1994). *Belief Systems as Barriers to Learning in Geological Education*. Journal of Geological Education, 94, 134-140.
- Azam M.F., Wagnon P., Berthier E., Vincent C., Fujita K., Kargell J.S. (2018). *Review of the status and mass changes of Himalayan Karakoram glaciers*. Journal of Glaciology, 64, 61-74.
- Bajracharya B., Shrestha A. B., Rajbhandari L. (2007). *Glacial Lake Outburst Floods in the Sagarmatha Region*. Mountain Research and Development, 27(4), 336-344.
- Bajracharya S. R., Mool P. (2009). *Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal*. Annals of Glaciology 50(53), 81-86.
- Baroni C., Frezzotti M., Smiraglia C. (2017). *Il Comitato Glaciologico Italiano. Oltre un secolo di ricerche glaciologiche in Italia*. In: *Itinerari glaciologici sulle montagne italiane*. Vol. 1. Guide Geologiche Regionali. SGI-CGI.
- Bolch T., Kulkarni A., Kaab A., Huggel C., Paul F., Cogley J. G., Frey H., Kargell J. S., Fujita K., Scheel M., Bajracharya S., Stoffel M. (2012). *The State and Fate of Himalayan Glaciers*. Science, 336, 310-314.
- Bolch T., Buchroithner M., Pieczonka T., Kunert A. (2008). *Planimetric and volumetric glacier changes in the Khumbu Himal, Nepal, since 1962 using Corona, Landsat TM and ASTER data*. Journal of Glaciology, 54, 187, 592-600.
- Bollasina M. A., Ming Y., Ramaswamy V. (2011). *Anthropogenic Aerosols and the Weakening of the South Asian Summer Monsoon*. Science, 334, 502-505.
- Brahmbhatt R., Nainwal H.C., Kulkarni A.V. (2014). *Impact of accumulation area ratio on glacial change: A few examples of Jammu and Kashmir*. Journal of Geomatics, 8 (1), 61-65.
- Bhutiya M. R., Kale V. S., Pawar N. J. (2010). *Climate change and the precipitation variations in the north-western Himalaya: 1866-2006*. Int. Journal Climat., 30, 535-548.
- Carosi R., Lombardo B., Musumeci G., Pertusati P.C. (1999). *Geology of the Higher Himalayan Crystallines in Khumbu Himal (Eastern Nepal)*. J. Asian Earth Sci. 17, 785-803.
- Carosi R., Montomoli C., Iaccarino S. (2018). *20 years of geological mapping of the metamorphic core across Central and Eastern Himalayas*. Earth-Science Reviews, 177, 124-138.
- Chen W., Doko T., Liu C., Ichinose T., Fukui H., Feng Q., Gou P. (2014). *Changes in Rongbuk Lake and Imja Lake in the Everest region of Himalaya*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-2, 259-266.
- Dehecq A., Gourmelen N., Brun F., Golberg D., Berthier E., Vincent C., Wagnon P., Trouvé E. (2019). *Twenty-first century glacier slowdown driven by mass loss in High Mountain Asia*. Nature Geoscience, 12, 22-27.
- Dyhrenfurth G. O. *Il telerilevamento per lo studio dei ghiacciai*. Baldini & Castoldi (1995).
- Freshfield, D. W. (1903). *Round Kangchenjunga. A Narrative of Mountain Travel and Exploration*. Edward Arnold, London.
- Fujita K., Nuimura T. (2011). *Spatially heterogeneous wastage of Himalayan glaciers*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108 (34), 14011-14014.
- Gardelle J., Berthier E., Arnaud Y., Kaab A. (2013). *Regionwide glacier mass balances over the Pamir Karakoram-Himalaya during 1999-2011*. The Cryosphere, 7, 1263-1286.
- Douglas W. Freshfield (1903). *Round Kangchenjunga: a narrative of mountain travel and exploration*. Edward Arnold, London.
- GLIMS (Global Land Ice Measurements from Space) <http://glims.colorado.edu/glacierdata/>
- Grabs W. E., Hanish J. (1993). *Objectives and Prevention Methods for Glacier Lake Outburst Moods (GLOFs)*. Snow and Glacier Hydrology. IAHS Publ. no. 218.
- King O., Quincey D.J., Carrivick J.L., Rowan A.V. (2017). *Spatial variability in mass loss of glaciers in the Everest region, central Himalayas, between 2000 and 2015*. The Cryosphere, 11, 407-426.
- Kraaijenbrink P. D. A., Bierkens M. F. P., Lutz A.F., Immerzeel W.W. (2017). *Impact of a global temperature rise of 1.5 degrees Celsius on Asia's glaciers*. Nature, 549, 257-260.
- Krishna R. (Coordinating Lead Authors) et al. (2019). *Unravelling Climate Change in the Hindu Kush Himalaya: Rapid Warming in the Mountains and Increasing Extremes*. In: Wester P., Mishra A., Mukherji A. & Shrestha A. B. (eds): "The Hindu Kush Himalaya Assessment- Mountains, Climate Change, Sustainability and People", Springer Nature Switzerland AG, Cham, 57-95.
- Immerzeel W.W., Van Beek L.P., Bierkens M.F. (2010). *Climate change will affect the Asian water towers*. Science, 328, 1382-1385.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2019). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (IPCC, 2019)*.
- Le Quéré C. et al. (2018). *Global Carbon Budget 2018*. Earth Syst. Sci. Data <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018> (2018).
- Mortara G., Pecci M. (2005). *Quando la ricerca geomorfologica va in alta quota*. SLM - Sopra il Livello del Mare, 20, 2-9.
- Nicholson L., Mc Carthy M., Prithard H.D., Willis I. (2018). *Supraglacial debris thickness variability: impact on ablation and relation to terrain properties*. The Cryosphere, 12, 3719-3734.
- Nie Y., Liu Q., Liu S. (2013). *Glacial Lake Expansion in the Central Himalayas by Landsat Images, 1990-2010*. PLOS ONE, 8, 12, 1-8.
- Paul F., Huggel C., Kaab A. (2004). *Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers*. Remote Sensing of Environment, 89, 510 - 518.
- Pelto M. (2015). *Kangchenjunga Glacier, Nepal volume losses*. blogs.agu.org/fromglaciersperspective/2015/12/23/kangchenjunga-glacier-nepal-volume-losses/
- Prithard H.D. (2017). *Asia's glaciers are a regionally important buffer against drought*. Nature, 545, 169-174.
- Racoviteanu A.E., Arnaud Y., Williams M.W., Manley W.F. (2015). *Spatial patterns in glacier characteristics and area changes from 1962 to 2006 in the Kanchenjunga-Sikkim area, eastern Himalaya*. The Cryosphere, 9, 505-523.
- Ren J., Jing Z., Pu J., Qin X. (2006). *Glacier variations and climate change in the central Himalaya over the past few decades*. Annals of Glaciology, 43(1), 218-222.
- Ren Y.Y., Ren G.Y., Sun X.B., Shrestha A.B., You Q.L., Zhan Y.J., Rajbhandari R., Zhang P.F., Wen K.M. (2017). *Observed changes in surface air temperature and precipitation in the Hindu Kush Himalayan region over the last 100-plus years*. Advances in Climate Change Research, 8, 148-156.
- Rowan A.V. (2017). *The 'Little Ice Age' in the Himalaya: A review of glacier advance driven by Northern Hemisphere temperature change*. The Holocene, 27(2), 292-308.
- Salerno F., Buraschi E., Bruccoleri G., Tartari G., Smiraglia C. (2008). *Glacier surface-area changes in Sagarmatha National Park, Nepal, in the second half of the 20th century, by comparison of historical maps*. Journal of Glaciology, 54 (187), 738-752.
- Salerno F., Guyennon N., Thakuri S., Viviano G., Romano E., Vuilleumoz E., Cristofanelli P., Stocchi P., Agrillo, Ma Y., Tartari G. (2015). *Weak precipitation, warm winters and springs impact glaciers of south slopes of Mt. Everest (central Himalaya) in the last 2 decades (1994-2013)*. The Cryosphere, 9, 1229-1247.
- Sánchez-Lugo A., Berrisford P., Morice C., Argüez A. (2018). *Temperature [in State of the Climate in 2018]*. Bulletin of the American Meteorological Society, 99(8), S11-S12.
- Jain S.K., Lohani A.K., Singh R. D., Chaudhary A., Thakural L. N. (2012). *Glacial lakes and glacial lake outburst flood in a Himalayan basin using remote sensing and GIS*. Natural Hazards Vol. 62(3), 887-899.
- Searle M.P., Szulc A. G. (2005). *Channel flow and ductile extrusion of the high Himalayan slab-the Kangchenjunga-Darjeeling profile, Sikkim Himalaya*. Journal of Asian Earth Sciences 25(1), 173-185.
- Shrestha A. B., Wake C. P., Mayewski P. A., Dibb, J. E. (1999). *Maximum temperature trends in the Himalaya and its vicinity: An analysis based on temperature records from Nepal for the period 1971-94*. Journal Climate, 12, 2775-2786.
- Smiraglia C., Diolaiuti G., Fugazza D., Azzoni R.S., Bollati A., Ventura F. (2019). *Remote sensing e repeat photography per lo studio dei ghiacciai himalayani: esempi dal Nepal e dalla Cina*. NIMBUS, 81, 20-37, ISSN1122-4339.
- Wheeler E. O. (1925). *Sketch Map of Mount Everest from Surveys of the Expeditions of 1921 and 1924*. With Geology added by N.E. Odell. Royal Geographical Society, London.