# FLUTTUAZION delle AREE AREE Di Spesso senza neve in estate di ACCUMULO NIVALE GHIACCIAIO SulGHIACCIAIO dell'ADAMELLO

Amerigo Lendvai, Paolo Gallo Commissione Scientifica -Servizio Glaciologico Lombardo (SGL)

#### SNOW ACCUMULATION AREA FLUCTUATIONS ON THE ADAMELLO GLACIER BASIN (Central italian Alps) Satellite images and data analysis from 1984 to 2021

Although Adamello Glacier is the largest of the Italian Alps, direct monitoring measurements of the snow accumulation areas has been historically discontinuous due to the difficult access to its large and remote surface. Accumulation Area Ratio (AAR) is the fraction of ice surface covered by snow at the end of the ablation seasons and allows a good estimation of the net mass balance of a glacier. In order to fill the gaps in the historic data series of AAR index, thanks to the continuous improvements in satellite remote sensing, an almost complete thirty years (1984-2021) data series of representative images has been collected. The data collected for the Adamello Glacier show not only a decreasing trend in the decadal average of accumulation area, but also: 1) a 13-15 years return period for single-year outlier with positive anomalies is shown, 2] a negative anomaly observed in the recent period, set to -87% lower compared to the 1984-2013 average. Standardized Anomaly Index (SAI) method has been used in order to explore correlations between snowcovered area (Accumulation Area – AA) values and the climate forcing which is assumed as the combined June-September air temperature and October-May precipitations.

## Analisi delle immagini satellitari dal 1984 al 2021

Il Ghiacciaio dell'Adamello è il più grande delle Alpi Italiane, tuttavia le attività di monitoraggio e quantificazione dell'innevamento residuo sul campo sono state da sempre discontinue a causa del difficile accesso alla sua remota ed estesa superficie.

L'Accumulation Area Ratio (AAR) indica la percentuale di ghiacciaio coperta da neve al termine della stagione di ablazione e consente di stimare il bilancio di massa netto del ghiacciaio stesso. Per colmare le lacune nei dati storici dell'indice AAR, grazie all'evoluzione della tecnologia di telerilevamento da satelliti, è stata selezionata una serie pressoché completa di immagini rappresentative delle condizioni di innevamento residuo per il periodo 1984-2021.

Dai dati elaborati sul ghiacciaio dell'Adamello, oltre alla tendenza di riduzione dell'innevamento a fine estate su medie decennali, emergono anche: 1) un periodo di ritorno di 13-15 anni per gli eventi outlier aventi anomalie positive, 2) una recente significativa anomalia negativa dell'innevamento con un -87% rispetto alla media trentennale 1984-2013.

È stato anche impiegato il metodo del Standardized Anomaly Index (SAI) per cercare correlazioni significative tra i valori di area coperta da neve (Accumulation Area – AA) e la forzante climatica data dalle temperature medie del quadrimestre Giugno-Settembre combinate alle precipitazioni del periodo Ottobre-Maggio.



Il Ghiacciaio dell'Adamello con i suoi 14,3 km<sup>2</sup> è tutt'ora il più grande delle Alpi italiane e molto probabilmente anche il più profondo, con oltre 230 metri di spessore rilevati nel 2021 nei pressi del Passo Adamè [20]. Insieme ai Ghiacciai di Fellaria (Bernina) e al Ghiacciaio dei Forni costituisce oltre il 40% dell'area glacializzata della Lombardia. In questo settore delle Alpi Lombarde si contano altri 26 ghiacciai (tra cui i principali sono: Pisgana, Venerocolo, Avio e Aviolo). La numerosità di questi apparati è in realtà in aumento, ma solo a causa della frammentazione che continuano a subire nel corso del ritiro avvenuto dopo la fine della Piccola Età Glaciale attorno al 1850. Il ghiaccio che vediamo oggi è stato probabilmente in gran parte accumulato in quella fase climatica particolarmente favorevole al glacialismo. Nel '900 è stata registrata una fase di lieve inversione di tendenza tra il 1965 e il 1985, da allora il declino è stato sempre più intenso: il trend di riduzione areale nei settori limitrofi è ora 5-6 volte quello osservato fino alla fine del '900 [17] (Fig. 1).

Il grande altopiano del Pian di Neve fino a pochi decenni fa rimaneva coperto da un manto bianco per tutta l'estate, così da consentire nel tempo la formazione di nuovo ghiaccio, che poteva poi fluire fino alla fronte del Mandrone, quella principale, oltre 5 chilometri lineari e 500 metri di altitudine più a valle, ma anche verso le effluenze secondarie dell'Adamè e del Salarno (Fig. 2). Avere un bacino di accumulo per un ghiacciaio è vitale per poter funzionare come tale, per essere "vivo". Per stimare il bilancio di massa del ghiacciaio, i volontari del Servizio Glaciologico Lombardo rilevano

Fig. 1 - Evoluzione della superficie del Ghiacciaio dell'Adamello negli ultimi 40 anni.



Fig. 2 -Contestualizzazione e topografia del Ghiacciaio dell'Adamello.



ogni anno i dati delle paline ablatometriche (aste di legno infisse nel ghiaccio per 10 metri e solidali con esso, che, in conseguenza della sua graduale fusione superficiale "emergono" permettendo di misurarne la perdita di spessore) (Fig.3). Sappiamo così che negli ultimi 10 anni in media fondono oltre 5 metri di ghiaccio a quota 2600, vicino alla fronte del Mandrone, quasi 3 metri a quota 2800, quindi in tutta la zona intermedia, che si estendeva fino al margine di Passo Brizio e Punta del Venerocolo, ma addirittura 70 centimetri anche sul Pian di Neve a oltre 3100 metri di altitudine.

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 (Fig. 4). Per prassi si fa coincidere tale confine con la Snow Line stagionale, ossia il limite della neve residua alla fine della stagione estiva sulla superficie del ghiacciaio, in quanto tale neve è destinata, almeno per l'anno di competenza a costituire nuova massa utile alla formazione di nuovo ghiaccio qualora sia conservata anche per gli anni a seguire. L'area che presenta ancora neve alla fine della stagione estiva, ossia con accumulo di massa, si definisce Accumulation Area (AA) e, rapportandola a quella totale del ghiacciaio si ottiene anche l'Accumulation Area Ratio (AAR), che è un utile indice del bilancio di massa (Fig. 5).

Nonostante il Ghiacciaio dell'Adamello sia il più grande delle Alpi Italiane, le attività di monitoraggio sul campo sono state da sempre discontinue a causa del difficile accesso alla sua remota ed estesa superficie. Inoltre, le osservazioni dirette della Snow Line stagionale, normalmente utilizzata per una stima dell'Accumulation Area Ratio (AAR), da cui dipende l'Indice di Bilancio di Massa, sono piuttosto difficili, sempre a causa della rilevante estensione areale, dato che è anche in gran parte un altopiano (Pian di Neve Inferiore e Superiore) (Figg. 6,7,8,9,10). Non esistono infatti punti che consentano di osservare l'intero apparato, pertanto sono necessarie diverse uscite per poter raccogliere fotografie utili alla determinazione della snow-line. Se si unisce l'impegno fisico con quello della variabilità delle condizioni di visibilità in alta quota a fine estate, è facile comprendere il motivo della discontinuità dei dati disponibili.

Per colmare le lacune nei dati storici, grazie all'evoluzione della tecnologia di telerilevamento da satelliti, è stata elaborata una serie pressoché completa di immagini rappresentative delle condizioni di innevamento residuo alla fine della stagione di ablazione glaciologica per il periodo 1984-2021.

La sempre maggiore disponibilità di immagini satellitari gratuite come quelle della costellazione statunitense Landsat e di quella europea Sentinel e di computer consumer ad elevata capacità di calcolo in grado di gestirle, offrono grandissimi vantaggi per gli studi glaciologici. Primo fra tutti sicuramente il punto di osservazione privilegiato (nadirale), che permette di osservare per intero la superficie anche di ghiacciai estesi o poco raggiungibili; inoltre, la possibilità di riportare l'immagine su un modello digitale del terreno consente di effettuare misurazioni affidabili delle superfici. Altro aspetto rilevantissimo è la disponibilità di sensori avanzati che catturano anche le bande spettrali oltre il campo visivo, rendendo visibili differenze invisibili all'occhio umano, sfruttate anche in questo studio, come da metodologia esposta di seguito.

### METODOLOGIA

Sono state utilizzate un centinaio di immagini multispettrali dei mesi di Agosto, Settembre e Ottobre tra il 1983 e il 2021 dei satelliti Landsat 4-5-7-8 e Sentinel-2 disponibili dagli archivi pubblici online [18, 19]. Sono state quindi selezionate solo quelle senza copertura nuvolosa e nevicate precoci, quindi rappresentative delle condizioni dell'innevamento residuo alla fine della stagione di ablazione (Fig. 15).



Fig. 3 - Palina ablatometrica a quota 2750 (Fonte: Paolo Pagliardi).

Fig. 4 - Indicazione della linea di equilibrio teorico (ELAO) del ghiacciaio dell'Adamello rispetto alla configurazione attuale, che cade quasi esattamente a 3000m. Solo con neve che copra il ghiacciaio su questa estensione potrebbe mantenersi come lo osserviamo oggi.

> Fig. 5 - Tabella per la definizione convenzionale dell'Indice di Bilancio di Massa (21).



DEFINIZIONE CONVENZIONALE DELL'INDICE DI BILANCIO DI MASSA							
incremento forte	IF	Neve vecchia sull'intero corpo glaciale e anche sul terreno circostante	AAR = 1				
incremento moderato	IM	Neve vecchia estesa su oltre il 90% del ghiacciaio	AAR ≥ 0.9				
incremento lieve	IL	Neve vecchia su oltre il 67% del ghiacciaio	0.67 > AAR > 0.9				
stazionario	S	Neve vecchia sul 44-67 % del ghiacciaio	$0.44 \geq AAR \geq 0.67$				
decremento lieve	DL	Neve vecchia sul 20-44% del ghiacciaio	$0.2 \ge AAR > 0.44$				
decremento moderato	DM	Neve vecchia molto scarsa (< 20%), riduzione di spessore e superficie	0.05 > AAR > 0.2				
decremento forte	DF	Neve vecchia sostanzialmente assente, marcata riduzione di spessore e superficie	AAR ~ 0				
			© AINEVA				

Fig. 6 - L'altopiano del Pian di Neve superiore (3250 m s.l.m.) già senza neve a metà agosto del 2018 (Foto: A. Lendvai).



Fig. 7 - Vista panoramica dalla lingua del Mandrone (destra) al Pian di Neve inferiore (sinistra) al 08/09/2018 dalla Lobbia Alta (Foto: A. Lendvai).



Fig. 8 - Pian di Neve dal bivacco Ugolini il 20/08/2021 (Foto: A. Lendvai).



Fig. 9 - Panoramica da Punta del Venerocolo il 04/09/2021 (Foto: A. Lendvai).



Fig. 10 - Panoramica del Pian di Neve dal Corno Miller il 21/08/2021 (Foto: A. Lendvai).



Media (%)

84

74

53

40

29

21

12



Fig. 11 - immagine satellitare del 26 Agosto 2021 in colori naturali (a) e in "falsi colori" (b): sfruttando le bande dell'infrarosso si può distinauere molto più facilmente la neve dal ghiaccio.

Fig. 12 - (a) immagine



Neve fresca

Firn

Neve in fusione

Ghiaccio pulito

Ghiaccio sporco

Samples [24].

Ghiaccio leggermente sporco

Ghiaccio coperto di detriti

VALORI DI ALBEDO PER NEVE E GHIACCIO (BENN & EVANS, 1998)

Intervallo (%)

80-97

66-88

43-69

34-51

26-33

15-25

10-15

negativo di innevamento della moderatamente positivo.

Sfruttando le bande dell'infrarosso (NIR e SWIR) per ottenere immagini in "falsi colori" si può ottimizzare la distinzione tra i diversi materiali che compongono il suolo visibile, superando i limiti dei colori reali, che porterebbero invece a confondere più facilmente il ghiaccio più vecchio e sporco dalle rocce circostanti, oppure la neve stagionale dal firn pluriennale o da neve più recente che non partecipa ad apportare massa per il bilancio annuale del ghiacciaio; inoltre, anche le nuvole nell'infrarosso hanno una differente firma spettrale rispetto alla neve, mentre appaiono entrambe bianche nel campo visivo (Figg. 11ab e Figg. 12abc).

Il differente potere riflettente (albedo) che può assumere la superficie del ghiacciaio è parte delle caratteristiche che ne determinano la firma spettrale (Fig. 13).

Per ciascun anno è stata individuata l'immagine più rappresentativa delle condizioni di innevamento al termine della stagione di ablazione ed è stata effettuata l'analisi di dettaglio necessaria per definire la snow-line e quindi la quantificazione dell'area di accumulo annuale. Questa procedura è stata eseguita in modo semi-automatico (metodo Interactive Supervised Classification) grazie all'impiego di software GIS in cui sono stati campionati singoli pixel rappresentativi rispettivamente di neve, ghiaccio, firn, roccia (Training Samples) e lasciando che venissero associati a tali categorie tutti gli altri pixel dell'immagine [23]. In particolare, il metodo Maximum Likelihood considera sia le medie che le covarianze delle firme spettrali dei Training Samples per assegnare un valore ai restanti pixel e un livello di confidenza. Laddove sono stati riscontrati bassi livelli di confidenza, la Supervised Classification è stata ripetuta aumentando la densità dei Training

Partendo dalla classificazione automatica, sono stati poi fatti aggiustamenti manuali, necessari per esempio laddove le ombre dei detriti o delle pareti rocciose alteravano la corretta identificazione e in base anche ai punti di controllo definiti negli anni recenti dai dati delle paline ablatometriche gestite dal SGL e dalle fotografie scattate dagli operatori presenti nell'archivio dell'SGL.

In questo modo, sono stati ottenuti degli output sotto forma di raster vettorializzati. Le risoluzioni al suolo variano tra i diversi sensori disponibili e tra i satelliti considerati, ma risultano in generale tra i 20 e i 30 metri dal 1983 al 2015. Successivamente, grazie alla nuova generazione di satelliti Sentinel-2, la risoluzione delle bande utilizzate è aumentata a 10 metri consentendo una migliore accuratezza nella distinzione e quindi nella classificazione delle immagini. Al tempo stesso è aumentato il numero delle immagini disponibili per ogni stagione, dato il maggiore numero di satelliti operativi, promettendo risultati via via più affidabili.

#### Analisi dei risultati

Da questa serie di dati, valutandone

satellitare del 26 Agosto 2021. la più recente della serie storica qui elaborata: circa il 38% della superficie è indice di un bilancio di massa lievemente negativo; (b) immagine satellitare del 4 Settembre 2019, record serie storica qui elaborata: meno del 5% della superficie è indice di un bilancio di massa fortemente negativo; (c) immagine satellitare al 26 Agosto 2001, record positivo di innevamento negli ultimi 20 anni: oltre il 90% della superficie è indice di un bilancio di massa

Fig. 13 - Valori di albedo per neve e ghiaccio (Benn & Evans, 1998).

Fig. 14 - Risultati numerici della serie storica elaborata delle aree di accumulo nivale 15. Set di immagini satellitari in "falsi colori" con le delimitazioni dell'area di accumulo annuale di massa.

#### ANALISI DEI RISULTATI

Anno	Data immagine	Area copertura nevosa [km <sup>2</sup> ]	Anno	Data immagine	Area copertura nevosa [km <sup>2</sup> ]
1984	26/08/1984	18,1	2003	n.d.	n.d.
1985	14/09/1985	9,7	2004	02/09/2004	1,7
1986	16/08/1986	14,7	2005	05/09/2005	3,6
1987	20/09/1987	0,5	2006	24/09/2006	6,1
1988	13/08/1988	12,5	2007	11/09/2007	1,5
1989	25/09/1989	4,6	2008	20/08/2008	4,4
1990	12/09/1990	5,3	2009	31/08/2009	7,4
1991	30/08/1991	6,0	2010	03/09/2010	5,9
1992	17/09/1992	10,4	2011	14/09/2011	3,1
1993	19/08/1993	11,4	2012	n.d.	n.d.
1994	07/09/1994	9,9	2013	03/09/2013	8,1
1995	n.d.	n.d.	2014	29/08/2014	13,7
1996	n.d.	n.d.	2015	26/08/2015	5,8
1997	01/10/1997	7,7	2016	03/09/2016	2,1
1998	02/09/1998	0,1	2017	29/08/2017	0,3
1999	n.d.	n.d.	2018	24/09/2018	0,4
2000	22/08/2000	7,7	2019	04/09/2019	1,0
2001	25/08/2001	15,7	2020	13/09/2020	4,4
2002	20/08/2002	7.7	2021	26/08/2021	5,5

Fig. 15 - Set di immagini satellitari in "falsi colori" con le delimitazioni dell'area di accumulo annuale di massa. l'interpolazione lineare e le medie decennali, emerge innanzitutto la tendenza incrementale di riduzione della superficie del ghiacciaio coperta da neve a fine stagione (Fig. 14). Sull'intera serie storica, tale grandezza diminuisce di circa 0,198 km<sup>2</sup> ogni anno, mentre le medie decennali mostrano un cambio di regime dopo il 2003.

In secondo luogo, si può notare un periodo di ritorno di 13-15 anni per gli eventi outlier aventi anomalie positive (1984, 2001, 2014), anch'esse però decrescenti nel tempo in termini di intensità.

È evidente anche la grande anomalia negativa senza precedenti dall'inizio delle osservazioni relativa al quadriennio recente 2016-19. Rispetto alla media trentennale (1984-2013 vedi Fig. 16) dell'Area di Accumulo (AA) (7.35 km<sup>2</sup>), l'intervallo 2016-19 ha registrato valori





Fig. 16 - Serie storica dei dati dell'area di accumulo nivale annuale e analisi dell'andamento e delle anomalie la differente colorazione dello sfondo è l'Indice di Bilancio di Massa, che è positivo nel blu al crescere dell'AAR dal 67% in su, è in equilibrio per AAR tra il 44% e il 67%, negativo per AAR inferiori al 44%. Si noti come le linee che demarcano ali intervalli descritti e colorati tendono verso il basso nel tempo; ciò è conseguenza della riduzione areale del ghiacciaio nelle sue porzioni a quote e esposizioni più sfavorevoli, per cui oggi è sufficiente un innevamento di quasi 2 km<sup>2</sup> inferiore rispetto a 30 anni fa per raggiungere un bilancio di massa in equilibrio o positivo

Fig. 17 - Analisi degli SAI dell'area di accumulo annuale e degli SAI delle temperature da Giugno a Settembre, delle precipitazioni da Ottobre a Maggio e l'Indice Glaciologico come forzante climatica combinata (SAI\_T - SAI\_P), calcolati sulla serie di dati meteorologici della stazione svizzera di Sils-Maria.



inferiori dell'87%, con una copertura media di neve a fine estate ridottissima (0.94 km²).

Nonostante le ultime due annate (2019-20 e 2020-21) abbiano mostrato superfici innevate molto più abbondanti (~5 km²), l'indice AAR medio si attesta attorno al ~35%, un valore ampiamente insufficiente per permettere al ghiacciaio un bilancio di massa in equilibrio (IMB stazionario). Per raggiungere tale valore occorre teoricamente un AAR nel range 44-67%.

È stato impiegato il metodo del Standardized Anomaly Index (SAI) per cercare correlazioni significative tra i valori di AA e le forzanti climatiche, che in ambito glaciologico sono frequentemente associate alle temperature medie del quadrimestre Giugno-Settembre e alle precipitazioni del periodo Ottobre-Maggio. Il SAI è così calcolato:

$$\mathsf{SAI}_i = \frac{X_i - \mu_X}{\sigma_X}$$

Dove *i* è l'anno, *X* è la variabile (temperatura media o precipitazione cumulata dei mesi sopra citati per l'ambito glaciologico),  $\mu \in \sigma$  sono rispettivamente la media e la deviazione standard della serie storica della variabile *X*.

Combinando il SAI delle precipitazioni

con il SAI delle temperature, si ottiene il cosiddetto Indice Glaciologico, che combina le due forzanti in un'unica grandezza, solitamente ben correlata con l'andamento dei bilanci di massa dei ghiacciai [22]. È stata selezionata la stazione meteorologica svizzera di Sils-Maria, in guanto riferimento climatico delle Alpi Centrali con dati validati omogeneizzati dal 1864. Dati meteorologici più locali sono disponibili, per esempio dagli archivi di ARPA Lombardia, ma solo con serie storiche notevolmente più ridotte e con discontinuità rilevanti soprattutto tra gli anni '90 e i primi anni 2000, a causa dell'avvenuto rinnovamento del



Fig. 18 - Correlazione degli SAI dell'area di accumulo annuale e degli SAI delle temperature (a) da Giugno a Settembre e delle precipitazioni da Ottobre a Maggio (b) calcolati sulla serie di dati meteorologici della stazione svizzera di Sils-Maria; correlazione con l'Indice Glaciologico come forzante climatica combinata (SAI\_T -SAI\_P) (c).

parco strumentale e del passaggio di competenza dal Servizio Idrografico Nazionale (SIMN) e i servizi regionali ARPA. Soprattutto per le precipitazioni è difficile individuare una serie affidabile e rappresentativa, paragonata a quella selezionata, anche a causa del fatto che le precipitazioni nevose sono notoriamente di difficile rilevamento in alta quota, a causa degli errori di misura che presentano i pluviometri in tali condizioni [15]. Emerge una discreta correlazione (R<sup>2</sup>≈0,49) tra il SAI della AA con il SAI dell'indice glaciologico 1984-2020, mentre è evidente che le singole forzanti (precipitazioni e temperature) prese singolarmente non forniscono indicazioni statisticamente significative (Fig 18abc). Si può comunque osservare che fino al 2014, in corrispondenza di un SAI positivo delle precipitazioni, il SAI dell'AA è risultato quasi sempre anch'esso positivo, mentre negli ultimi 3 anni le precipitazioni sopra la media sono state ampiamente compensate dalle significative anomalie termiche positive (Fig. 17).

### CONCLUSIONI

Lo studio svolto ha consentito di elaborare una serie storica ultra-trentennale dei valori delle superfici con accumulo di massa annuali (Accumulation Area) per il Ghiacciaio dell'Adamello, colmando le lacune presenti nei dati dal monitoraggio diretto sul campo.

Si è così evidenziato e quantificato come il Pian di Neve, emblema della permanenza di copertura nevosa, a causa delle mutate condizioni climatiche, negli ultimi decenni fatichi enormemente a conservare neve fino al termine dell'estate. Dai primi anni 2000 è stato individuato un cambio di regime nella capacità di accumulare nuova massa, che ha portato la sua intera superficie al di sotto della quota minima di equilibrio di bilancio di massa.

Basandosi sui dati della stazione meteorologica di Sils-Maria (Engadina, Svizzera) emerge una significativa correlazione con le forzanti climatiche a scala regionale rimarcando la relazione fra il potere di conservare neve sul ghiacciaio con il connubio fra precipitazioni da ottobre a maggio e temperature tra giugno e settembre.

Saranno in futuro valutate le correlazioni con le temperature rilevate dalle stazioni meteorologiche gestite dal SGL presso il Monte dei Frati (3230 m slm) e Punta del Venerocolo (3320 m slm), in quanto particolarmente rappresentative delle condizioni a cui si trova esposto il Ghiacciaio dell'Adamello, non appena le serie storiche saranno sufficientemente lunghe e tra di loro raccordate da consentire analisi statisticamente significative.

Ulteriori indagini saranno inoltre sviluppate per migliorare la conoscenza delle dinamiche del Ghiacciaio dell'Adamello nell'attuale contesto climatico particolarmente ostile alla conservazione estiva della neve alle quote inferiori ai 3500 m s.l.m.

Questa è infatti la quota media attuale di equilibrio dei ghiacciai alpini, che è anche l'altezza della cima dell'Adamello, la più alta del gruppo. Tutti i ghiacciai di questa zona si trovano a quote molto più basse e, escludendo alcuni piccoli ghiacciai che godono di particolari condizioni topografiche, possono essere definiti dei "fossili climatici", perché generati da condizioni climatiche ormai "lontanissime" da quelle attuali.

Come visto sopra, sempre più spesso negli ultimi 20 anni l'intero Ghiacciaio dell'Adamello è rimasto quasi completamente senza neve prima della fine dell'estate. Tale condizione è la causa principale di bilanci di massa quasi sempre molto negativi. Secondo le stime più aggiornate, in conseguenza della sua quota massima piuttosto contenuta (-3400 m) è possibile che la sua scomparsa avvenga entro 60-80 anni [9, 16] (Fig. 19).

Alla luce di tutto quanto esposto, non deve preoccuparci tanto l'impossibilità di sciare in estate o la radicale modifica che subirà il paesaggio circostante l'Adamello e neanche la variazione del regime idrologico delle vallate tributarie, rispetto al fatto che il clima in pochi decenni è cambiato così tanto da far sì che questo ghiacciaio non si potrebbe generare nel contesto odierno. Rimane utile constatare infatti come le conseguenze su larga scala di queste rapide variazioni climatiche che stiamo osservando, più o meno indirettamente, dall'evoluzione dei ghiacciai rischiano di provocare una serie di problematiche di enorme entità per la civiltà umana, come ben riassunto dagli ultimi resoconti dell'IPCC [25].



#### **Bibliografia**

 1. Racoviteanu A. E. et al., Optical Remote Sensing of Glacier Characteristics: A Review with Focus on the Himalaya, Sensors MDPI, 2008

2. Paul F. et al., Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part II: Mapping Glacier Extents and Surface Facies and Comparison to Landsat 8, Remote Sensing MDPI, 2016

- 3. Egbers R. et al., Sentinel-2 data processing and identifying glacial features in Sentinel-2 imagery, 2016.

4. Smith T. et al., Improving semi-automated glacier mapping with a multi-method approach: applications in central Asia
5. Bamber L. J., Rivera A., A review of remote sensing methods for glaciermass balance determination, 2007.

- 6. Mernild, S. H., Pelto M., Malmros J. K., Yde J. C., Knudsen N. T., Hanna E., Identification of snow ablation rate, ELA, AAR and net mass balance using transient snowline variations on two Arctic glaciers, 2013.

7. Funakia S., Asaokab Y., Long-term change in ablation area of tropical glaciers by Landsat data, 2016.

8. Meteoswiss website (Sils/Maria climatic data) www.meteosvizzera.admin.ch (https://www.meteosvizzera.admin.ch/ home/clima/il-clima-svizzero-nei-dettagli/dati-omogeneizzati-dal-1864.html?station=sia)

9. Grossi G., Caronna P., Ranzi R., Bilancio di massa del ghiacciaio del Mandrone nel clima attuale e in quello prevedibile, «L'Acqua», 1 (2012), pp. 47-60.

 10. Grossi G., Caronna P., Ranzi R., Hydrologic vulnerability to climate change of the Mandrone glacier (Adamello-Presanella group, Italian Alps), «Advances in Water Resources», 55 (2013), pp. 190-203.

11. Gruppo di Lavoro Archivio Climatologico Italia centro-Settentrionale (ArCIS), Il clima nell'inverno 2013-2014: le eccezionali anomalie climatiche del Centro-Nord Italia, «Neve e Valanghe», 81 (2014), pp. 4-9. 12. Janetti E., Bocchiola D., Rosso R., Clima e risorsa idrica nivale sull'Adamello, «Neve e Valanghe», 63 (2008).

13. Jonas T., Marty C., Magnusson J., Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps, «Journal of Hydrology», 378 (2009), pp. 161-167.
14. Ranzi R., Grossi G., Gitti A., Taschner S., Energy and mass balance of the Mandrone Glacier, «Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria», 33 (2010), pp. 45-60.

15. Grossi G., Lendvai A., Peretti G., Ranzi R., Snow Precipitation Measured by Gauges: Systematic Error Estimation and Data Series Correction in the Central Italian Alps, Water, 2017
16. Zekollari H. et al, Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble, The Cryosphere, 2019

17. Scotti et al., Post LIA glacier change along a latitudinal transect in the Central Italian Alps, The Cryosphere, 2014

18. Archivio immagini Sentinel: apps.sentinel-hub.com

19. Archivio immagini Landsat: earthexplorer.usgs.gov
 20. www.ada270.com

21. Scotti R., Brardinoni F., Evaluating millennial to contemporary time scales of glacier change in Val Viola, Central Italian Alps, Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography, 100:4, 319-339, 2018.

22. Scotti R., Bilancio di massa e relazioni con il clima per alcuni ghiacciai italiani, ricostruzioni di bilanci passati e scenari per il futuro. Tesi Magistrale, Dipartimento di Scienze della Terra "A. Desio", Università degli Studi di Milano. 2009.
23. Gisgeography website https://gisgeography.com/imageclassification-techniques-remote-sensing/

24. Domadia G., Zaveri T., Comparative Analysis of Unsupervised and Supervised Image Classification Techniques. National Conference on Recent; Trends in Engineering & Technology.
25. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Fifth Assessment Report, 2014; Sixth Assessment Report, 2022

Fig. 19 - Evoluzione futura della massa glaciale del Ghiacciaio dell'Adamello e dell'intera Regione Lombardia nei più recenti scenari climatici IPCC elaborati da Zekollari et. al., 2019: lo scenario RCP 8.5 è detto "business as usual" perché non prevede alcun intervento per il contenimento del cambiamento climatico, RCP 4.5 prende in considerazione interventi moderati che non consentono il raggiungimento degli obbiettivi di contenimento a +2°C" (Accordo di Parigi), RCP 2.6 considera invece raggiunti gli obbiettivi di contenimento. Il destino del Ghiacciaio dell'Adamello appare comunque segnato ad una quasi totale estinzione entro fine secolo