



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Ingegneria per l'Ambiente e il territorio

A.a. 2023/2024

Sessione di Laurea Ottobre 2025

Monitoraggio di un ghiacciaio alpino

Analisi multitemporale del ghiacciaio del Rutor con tecniche
fotogrammetriche

Relatori:

Prof. Alberto Cina

Ing. Myrta Maria Macelloni

Candidati:

Tommaso Mainiero

RINGRAZIAMENTI

Desidero innanzitutto ringraziare il Professor Alberto Cina, mio mentore e figura centrale in questo percorso, per avermi trasmesso la passione che nutre per i suoi progetti e per avermi dato l'opportunità di essere coinvolto nel progetto *Glacier Lab*, esperienza che ha contribuito in modo fondamentale alla mia crescita.

Un sentito ringraziamento va al Professor Ambrogio Manzino, che ha saputo indicarmi la via e consigliarmi di proseguire i miei studi al Politecnico di Torino, in un ambiente che si è rivelato stimolante e ricco di opportunità.

Un grazie speciale all'Ingegnere Myrta Macelloni, per il sostegno costante durante la scrittura della tesi e per avermi mostrato, con il suo esempio, la passione nel proprio lavoro.

Ringrazio inoltre il Professor Vincenzo Di Pietra e l'Ingegnere Nives Grasso per avermi accolto nel gruppo di ricerca di Geomatica del Politecnico e per essere sempre stati pronti a darmi i giusti consigli.

Un pensiero riconoscente va anche a Umberto e Federico, che mi hanno accolto nella famiglia di ARPA VdA e che, con il loro esempio, mi hanno ispirato grazie all'amore per il lavoro che svolgono, la dedizione che li contraddistingue e il forte senso di amicizia e professionalità che accompagna le loro attività.

Un pensiero speciale va anche ai miei compagni di corso, Fil, Gio, Luca, Anna, Luigi, Dani, Chiara e Valentina, con i quali ho condiviso lezioni, fatiche ed entusiasmi: la vostra compagnia ha reso questo percorso molto più leggero e stimolante.

Agli amici di Torino sul Filo, Gianluca, Matteo, Federico, Denis, Toni, Loris, Jeff e Rasty, che fin dal mio primo giorno a Torino mi avete fatto sentire accolto in questa grande città e nel posto giusto.

Un grazie di cuore a Emilio, Giacomo e Ondra, fratelli di vita, che anche se lontani siete i migliori compagni di avventure che potessi mai desiderare.

Un ringraziamento agli amici della Slack, mi avete insegnato che i sogni sono i migliori obiettivi da inseguire.

Alla mia mamma Livia, al mio papà Vincenzo e a mia sorella Sofia, che mi hanno sempre sostenuto, ascoltato, incoraggiato e creduto in me, va tutta la mia gratitudine. In fine, alla mia compagna di vita, Marta, che mi ha accompagnato in questo meraviglioso percorso: insieme

abbiamo condiviso i momenti più belli divertendoci, e ci siamo sostenuti a vicenda nei momenti di difficoltà. La tua presenza, il tuo sorriso e la tua forza sono stati per me una fonte costante di serenità, incoraggiamento e motivazione.

Grazie a tutti.

ABSTRACT

Il cambiamento climatico genera eventi metereologici e climatici estremi e ciò comporta forti ripercussioni sugli ecosistemi naturali, sulla sicurezza alimentare ed idrica, sulla salute umana, sulle economie, sulle società e popolazioni in ogni area del globo.

L'ambiente di alta montagna e in particolare i ghiacciai sono tra gli elementi più sensibili ed a rischio per la continua evoluzione del cambiamento climatico. Data la loro forte vulnerabilità, i ghiacciai rappresentano un luogo di interesse per la valutazione delle variazioni di parametri fisici, chimici e biologici, rivelandosi ideali per la rilevazione precoce e lo studio delle possibili conseguenze delle azioni del cambiamento climatico e degli impatti sui sistemi idrologici, ecologici e sociali.

I ghiacciai sono l'elemento criosferico più significativo per le comunità montane alpine italiane ed europee, e come detto in precedenza, sono fonte insostituibile di informazioni sul cambiamento climatico. Si tratta di elementi con geometrie e morfologia fortemente variabili, che se confrontati con altre entità del paesaggio montano, i loro cambiamenti sono ben avvertibili anche nell'arco di una generazione umana. Inoltre i territori sottostanti le masse glaciali sono sempre più esposti a rischi maggiori, dovuti a fenomeni di nivazione, geliflusso, gravitativi, valanghivi e alluvionali, per cui ne è fondamentale lo studio al fine di poterne mitigare i rischi.

Il ghiacciaio preso in analisi è il Ghiacciaio del Rutor, situato nella Valle di La Thuile nelle Alpi Graie, all'interno della Regione autonoma della Valle d'Aosta, al confine italo francese. È monitorato dal 2020 dal gruppo di Ricerca Glacier Lab del Politecnico di Torino, in collaborazione con Arpa VdA e Digisky, azienda che rileva e produce prodotti fotogrammetrici da aeromobile e che ha sorvolato il ghiacciaio ogni settembre dall'inizio della collaborazione.

L'analisi multi temporale è stata svolta grazie al confronto dei prodotti cartografici, DSMs e Ortofoto, generati da tecniche fotogrammetriche SfM (Structure from Motion), alla base dell'odierna fotogrammetria digitale. Il remote sensing applicato in aree montane impervie, con la tecnologia fotogrammetrica, permette di acquisire grandi quantità di dati con un'elevata distribuzione spaziale, in confronto alle tecniche utilizzate in passato, che richiedevano grandi sforzi per ottenere piccole quantità di dati puntuali e sito specifici, solitamente interpolati per avere un risultato spaziale. La fotogrammetria e i suoi prodotti hanno rappresentato un'importante innovazione, migliorando significativamente l'efficacia del monitoraggio glaciale.

Il lavoro di tesi si è focalizzato su diversi aspetti, tra cui la comprensione della precisione dei prodotti cartografici (DSMs) e derivanti (DoD). È stato necessario identificare aree stabili nell'area rilevata e si è creato di un indice di stabilità con il fine di poterle confrontare. Avere consapevolezza dei limiti dello strumento utilizzato consente di riconoscere un livello adeguato di affidabilità delle deformazioni morfologiche rilevate sul ghiacciaio e attribuirne l'effettiva variabilità su basi statistiche.

Una volta comprese le potenzialità delle tecniche fotogrammetriche applicate, sempre mediante tecniche statistiche, si sono analizzate lungo il quinquennio la variabilità altimetrica della massa glaciale, la variabilità volumetrica, e il rapporto che hanno con la quota; si sono analizzati i processi di ritiro areale su tutto il ghiacciaio, con il tracciamento dei perimetri implementati al lavoro svolto dal dott. Villa nei primi anni 2000. Inoltre si è studiato il ritiro delle due lingue principali che caratterizzano il fronte, e si sono tracciate le linee di equilibrio che hanno caratterizzato il ghiacciaio mediante due metodi differenti, al fine di avere un dato più robusto e comprenderne la forte variabilità. In conclusione si è generato un algoritmo per il calcolo degli spostamenti dei crepacci mediante processi di autocorrelazione, alla base della fotogrammetria moderna e delle tecniche di image matching.

Gli algoritmi sviluppati in linguaggio Matlab ed utilizzati per l'analisi multitemporale sono disponibili nell'ultima sezione del documento di tesi.

INDICE

1. IL CAMBIAMENTO CLIMATICO	19
1.1. Introduzione al cambiamento climatico	19
1.2. Riscaldamento globale	19
1.3. Attività umana e cause specifiche del riscaldamento	22
1.4. L'impatto del cambiamento climatico sul globo	24
1.5. Criosfera	33
1.6. Fattori atmosferici rilevanti per i cambiamenti della criosfera	35
1.7. Conseguenze del cambiamento climatico in montagna e sui ghiacciai alpini	38
2. GHIACCIAI	41
2.1. Introduzione	41
2.2. Terminologia glaciologica e tipologie di ghiacciai	43
2.3. Dinamiche di formazione e bilancio dei ghiacciai	50
2.4. Importanza della copertura nevosa e dell'Albedo	53
2.5. Il movimento dei ghiacciai, processi erosivi e forme glaciale	54
2.6. Pericoli legati ai ghiacciai	57
3. GHIACCIAIO DEL RUTOR	59
3.1. I Ghiacciai della Valle d'Aosta	59
3.2. Monitoraggio dei Ghiacciai in Valle d'Aosta	61
3.3. Ghiacciaio del Rutor	63
3.4. Morfologia del ghiacciaio del Rutor	65
3.5. Analisi dei dati di letteratura riguardo al monitoraggio dei processi di ablazione ed Eventi Storici	66
3.6. Tecniche di monitoraggio dei ghiacciai	68
4. PRINCIPI DI FOTOGRAMMETRIA	71
4.1. Fotogrammetria da aereo, piani di volo e prodotti cartografici dei voli della ditta DigiSky	
78	

5.	ANALISI MULTITEMPORALE DEL GHIACCIAIO DEL RUTOR.....	92
5.1.	QGIS e Matlab	92
5.2.	Analisi dei profili del ghiacciaio	94
5.2.1.	Introduzione	94
5.2.2.	Analisi dei profili	96
5.2.3.	Script 1: Analisi dei profili estratti da DSM e DoD.....	135
5.2.4.	Conclusioni	135
5.3.	Teoria statistica e trattamento delle misure topografiche.....	137
5.3.1.	Introduzione	137
5.3.2.	Variabile statistica, Variabile casuale, Funzione di densità di probabilità	137
5.3.3.	Momenti di una variabile casuale come rappresentazione sintetica della funzione di distribuzione.....	138
5.3.4.	Indice di correlazione.....	140
5.3.5.	Distribuzione normale o di Gauss	141
5.3.6.	Teorema centrale della statistica	142
5.3.7.	Secondo corollario del teorema della media e Principio di propagazione della varianza	143
5.3.8.	Stima ai minimi quadrati.....	145
5.4.	Analisi differenziale tra DSM	148
5.4.1.	Introduzione	148
5.4.2.	Definizione delle aree stabili.....	148
5.4.3.	Analisi dell'indice di correlazione tra DSMs delle aree stabili vicine ai GCPs e analisi statistica dei DoDs (Difference of DSMs).....	150
5.4.4.	Analisi dell'indice di correlazione tra i DSMs delle aree stabili lontane dai GCPs e analisi statistica dei DoDs	164
5.4.5.	Confronto dei risultati	168
5.4.6.	Script 2: Analisi statistica DoD.....	169

5.4.7.	Calcolo della precisione e LoD (Limit of detection) dei DSMs e dei DoD mediante analisi statistica	170
5.4.8.	Indice di Stabilità	178
5.5.	Studio della variabilità altimetrica e volumetrica del ghiacciaio durante il quinquennio 2020-2024.....	180
5.5.1.	Introduzione	180
5.5.2.	Variabilità altimetrica e volumetrica	180
5.5.3.	Confronto dei risultati	191
5.5.4.	Script 4: Analisi statistica del DoD	193
5.5.5.	Script 5: Plot dell'analisi del DoD nel quinquennio 2020-2024	194
5.6.	Calcolo delle velocità di variazione areale ($m^2/anno$) di tutta la superficie del ghiacciaio	195
5.6.1.	Introduzione	195
5.6.2.	Calcolo della variazione areale dai prodotti Digisky	195
5.6.3.	Calcolo del ritiro areale dal LIA al 2024.....	197
5.7.	Calcolo della velocità media di arretramento del fronte del ghiacciaio	201
5.7.1.	Introduzione e metodologie di calcolo	201
5.7.2.	Fronte sinistro / lingua occidentale	203
5.7.3.	Fronte destro/ lingua orientale.....	205
5.7.4.	Fronte completo.....	207
5.8.	Tracciamento delle linee di equilibrio.....	209
5.8.1.	Introduzione	209
5.8.2.	Linea d'equilibrio 2020-2021.....	211
5.8.3.	Linea d'equilibrio 2021-2022.....	212
5.8.4.	Linea d'equilibrio 2022-2023.....	213
5.8.5.	Linea d'equilibrio 2023-2024.....	214
5.8.6.	Analisi dei risultati	215
5.9.	Calcolo dell'altezza media della neve sul rilievo 2024.....	216

6.	ANALISI DEGLI ANDAMENTI DI TEMPERATURA NEL PERIODO STRUMENTALE 2020-2024	217
7.	CALCOLO DELLO SPOSTAMENTO DEI CREPACCI MEDIANTE PROCESSI DI AUTOCORRELAZIONE	220
7.1.	Introduzione	220
7.2.	Algoritmo di Autocorrelazione a pixel intero	220
7.3.	Metodo di rappresentazione dei crepacci	221
7.4.	Applicazione dell'algoritmo di autocorrelazione e ottimizzazione del processo di calcolo	226
7.5.	Risultati	230
7.5.1.	Applicazione dell'algoritmo su un solo crepaccio	230
8.	CONCLUSIONE	239
9.	SCRIPT MATLAB	241
9.1.	Script 1: Analisi dei profili estratti da DSM e DoD	241
9.2.	Script 2: Analisi statistica DoD	245
9.2.1.	Script 2.1	245
9.2.2.	Script 2.2	264
9.2.3.	Script 2.2	276
9.2.4.	Script 2.3	284
9.3.	Script 3: Algoritmo per il calcolo del Lod mediante stima ai minimi quadrati	293
9.4.	Script 4: Analisi statistica del DoD	302
9.5.	Script 5: Plot dell'analisi del DoD nel quinquennio 2020-2024	317
9.6.	Script 6: Calcolo delle velocità di arretramento delle fronti glaciali	332
9.7.	Script 7: Analisi degli andamenti di temperatura mediante il modello climatico ERA5	337
9.8.	Script 8: Algoritmo per il riconoscimento dei crepacci e calcolo semi-automatico degli spostamenti	341

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Andamento del riscaldamento globale dall'anno 1 al 2020 e confronto tra l'andamento reale e l'andamento simulato senza l'impatto delle attività antropiche. (IPCC - AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023)	20
Figura 2: Anomalia di temperatura del periodo 1880 – 2023 rispetto al periodo di riferimento 1951 – 1980 pubblicata dal GISS (NASA's Goddard Institute of Space Studies).....	21
Figura 3: Anomalia di temperatura mensile del periodo 1880 – 2023 rispetto al periodo di riferimento 1951 – 1980 pubblicata dal GISS (NASA's Goddard Institute of Space Studies)....	21
Figura 4: Fenomeno dell'effetto serra, dalla radiazione solare alle onde lunghe assorbite e riemesse dai GHG	22
Figura 5: Andamento delle concentrazione dei GHG in atmosfera dal 1850 al 2019. (IPCC AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023)	23
Figura 6: Regioni del globo in cui si è manifestato un incremento delle ondate di calore e delle precipitazioni estreme, e la confidenza nella rappresentazione dei risultati. (IPCC AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023)	24
Figura 7: “Le ondate di calore e le tempeste tropicali possono rendere più potenti gli uragani, un fenomeno acuito dal riscaldamento globale. Nel 2017 su Puerto Rico si è abbattuto l'uragano Maria, che ha inflitto all'isola un danno senza precedenti nella storia. Oltre 3.000 persone sono morte a causa di questo uragano di categoria 5, che ha causato circa 90 miliardi di dollari (quasi 78 miliardi di euro) di danni a innumerevoli coltivazioni, case e infrastrutture fondamentali per la sanità e l'irrigazione. Anche dal punto di vista emotivo fu una catastrofe: nei tre mesi successivi all'uragano i tentati suicidi sono triplicati tra gli abitanti, che non riuscivano a rimettere insieme i pezzi della propria vita. Nella foto, la luce dell'alba illumina quello che resta di un'abitazione a Playa El Negro, cinque mesi dopo l'uragano Maria.” (FOTOGRAFIA DI CAROL GUZY, NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION)	25
Figura 8 : ”Il Lago di Urmia è un enorme lago iraniano ipersalino che è stato vittima di una serie di impatti negativi. L'evaporazione causata dal riscaldamento e il saccheggio delle sue acque per l'irrigazione hanno portato alla perdita del 90% del suo volume, tra il 1995 e il 2013. Gran parte di questo specchio d'acqua è oggi un deserto salato, e gli scienziati temono che il lago possa scomparire del tutto, se non vengono adottate misure drastiche di risparmio idrico.” (FOTOGRAFIA DI NEWSHA TAVAKOLIAN, NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION)	26

Figura 9 : “Foto di un orso polare magro ed emaciato, in cattive condizioni di salute, catturata e postata su Facebook dalla fotografa Kerstin Langenberger al largo del Mare di Barents, nell'arcipelago Norvegese delle Svalbard. Sul suo sito, la reporter spiega che quella ritratta nello scatto è «una femmina, quasi uno scheletro, con una zampa anteriore ferita, intenta forse a cacciare un tricheco, mentre è bloccata a terra». Per Langenberger, a ridurre così l'animale è stato il riscaldamento globale, che sta cancellando i ghiacci marini, piattaforma di caccia degli orsi bianchi, a tempo record” (Rivista Focus).....26

Figura 10: “L’aumento della temperatura del mare altera le condizioni ambientali rendendole intollerabili per i coralli che non riescono a sopravvivere. Le barriere coralline, un ecosistema vitale che ospita innumerevoli specie, sono fortemente in pericolo: le ricerche presentate nel 2020 indicano che entro il 2040 saranno morte tra il 70% e il 90% delle barriere coralline del mondo. Questi habitat vivono in un delicato rapporto di simbiosi con le alghe che forniscono loro le sostanze nutritive di cui hanno bisogno. Se la temperatura aumenta troppo, queste alghe, chiamate zooxantelle, non possono colonizzare i coralli, e le strutture di carbonato di calcio si “decolorano”. In questa foto il fotografo David Doubilet mostra il contrasto tra una Opal Reef (nella Grande barriera corallina australiana) in buona salute nel 2010, rispetto alla situazione nel 2019. Il danno è stato probabilmente causato da un picco nell’aumento della temperatura dell’oceano avvenuto nel 2016.” (FOTOGRAFIA DI DAVID DOUBILET, NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION)27

Figura 11: Il Lago Ciad, fonte di risorsa alimentare e idrica indispensabile per le popolazioni locali, situato nella parte centro-settentrionale dell’Africa, sui confini di Ciad, Camerun, Niger e Nigeria, nell’area del Sahel, si è ridotto di oltre il 90 % negli ultimi decenni. In figura immagini satellitari acquisite dal servizio Landsat NASA.....28

Figura 12: L’isola caraibica di Haiti è stata martoriata da una serie di disastri naturali, che si sono aggiunti all’instabilità politica e alla povertà. Nell’estate 2021, il Paese ha vissuto un terremoto di magnitudo 7.2, la tempesta tropicale Grace e l’assassinio del proprio presidente, tutto nell’arco di un periodo di sei settimane. Gli eventi climatici estremi hanno reso intollerabili le condizioni di vita già precarie. Questa foto aerea rappresenta la devastazione a Jérémie, ad Haiti, dopo l’uragano di categoria 4.(FOTOGRAFIA DI LOGAN ABASSI, UN MINUSTAH, NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION).....30

Figura 13: Sinistra : “Il riscaldamento globale minaccia alcune modalità di vita e sussistenza che esistono da secoli. Nella foto, un giovane cacciatore di balene sistema la carne nella “cantina” di permafrost di famiglia, a Barrow, in Alaska. Questo sistema di raffreddamento naturale viene compromesso dallo scioglimento del permafrost e dal decongelamento di terreni che sono rimasti

congelati per migliaia di anni. Gli incendi in regioni prima ghiacciate, come quelli avvenuti in Siberia nel 2021, stanno bruciando e rilasciando CO₂ dalla tundra e dalla torba, gli ecosistemi più densi di carbonio al mondo.” (FOTOGRAFIA DI KATIE ORLINSKY, NATIONAL GEOGRAPHIC)..... 31

Figura 14 : Stime cumulative del cambiamento della massa dei ghiacciai globali e relativi contributi all'innalzamento del livello del mare dal 1975. I cambiamenti di massa cumulativi in Gt (1 Gt = 10¹² kg) e gli equivalenti globali dell'innalzamento del livello del mare in mm sono mostrati con le incertezze correlate a intervalli di confidenza del 95%. (WGMS- Dussaillant et al. 2024) 32

Figura 15:Esempio di Permafrost (Morfologia periglaciale, scienzanatura) 34

Figura 16: Variazioni di massa annuali dei ghiacciai monitorati da oltre 30 anni. M w.e. corrisponde a 1 ton/m² (WGMS)..... 41

Figura 17: Le serie temporali regionali del cambiamento di massa annuale si basano su bilanci glaciologici e geodetici (Zemp et al., 2019). Sono sovrapposte medie pluriennali di Wouters et al. (2019) basate sul Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), calcolate solo per le regioni con un'area glaciale >3.000 km².Le stime di Gardner et al. (2013) sono state utilizzate nel 5° Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5. Le barre rosse e blu sulla mappa si riferiscono ai bilanci regionali mediati nel periodo 2006–2015, espressi in unità di kg m⁻² yr⁻¹ e mm di equivalente del livello del mare (SLE) yr⁻¹, e sono derivati dalle stime del bilancio di massa disponibili per ciascuna regione..... 42

Figura 18: Crepacci e seracchi 44

Figura 19: Nomenclatura degli apparati tipici di un ghiacciaio di circo. (MORFOLOGIA GLACIALE E PERIGLACIALE Responsabile d'area: Francesco Dramis - Università degli Studi di Roma Tre Coordinatore: Paolo Roberto Federici - Università degli Studi di Pisa)..... 46

Figura 20: Dinamica delle formazioni glaciali (Christopherson, 2010) 51

Figura 21: Schema di tre tipologie di ghiacciai localizzati a differenti quote e la corrispondente risposta all'innalzamento della linea di equilibrio (ELA)(IPCC AR5)..... 52

Figura 22: A sinistra la valle glaciale del rifugio Aosta: data la quota e il minor processo di sedimentazione conserva quasi completamente il tipico profilo ad U. (Scuola di alpinismo e scialpinismo Guido della Torre). A destra la vista risalente al 1866 della valle glaciale dello Yosemite vista dal punto panoramico “Union Point” (National park service). 54

Figura 23: Esempio di masso erratico ("Massi erratici - Singolari testimonianze glaciali nel paesaggio" realizzato dai professori Luigi e Michele Motta del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Torino, Regione Piemonte) 55

Figura 24: Processo di formazione di rocce montonate (Luigi Marson, Val Malenco Ecomuseo) ; esempio di roccia montonata (dinamica e fenomeni della morfologia glaciale, ScienzaNatura) .	56
Figura 25: Valanga di ghiaccio generata dal distacco di una porzione di ghiacciaio, trasformatasi successivamente in nubiforme. (Dimensione montagna).....	57
Figura 26: Distribuzione, area e variazioni dei ghiacciai valdostani suddivisi per gruppi montuosi.	59
Figura 27:Figura sinistra: Distribuzione delle aree dei ghiacciai valdostani in funzione di 7 classi dimensionali (sopra) valori in % sul totale; i valori sopra le colonne indicano le aree di ciascuna classe in km ² . Distribuzione del numero dei ghiacciai valdostani in funzione di 7 classi dimensionali (sotto) valori in % sul totale; i valori sopra le colonne indicano il numero di ghiacciai di ciascuna classe.	60
Figura 28: Ubicazione Regione autonoma della Valle d’Aosta e Ghiacciaio del Rutor.....	63
Figura 29 : Ghiacciaio del Rutor e toponomastica dell’area (mapy.cz)	64
Figura 30: Vista tridimensionale del ghiacciaio e Toponomastica dell’area (mapy.cz)	65
Figura 31: Figura sinistra: Misura dell'accumulo nevoso tramite GPR- Ground Penetrating Radar effettuata dei tecnici del Politecnico di Torino – DIATI;	69
Figura 32: Risoluzioni spaziali delle tecniche di telerilevamento utilizzate per il monitoraggio, relative alla tipologia di sensore e piattaforma.....	70
Figura 33: Sovrapposizione dei fotogrammi, tie points, esempio di piano di volo.....	71
Figura 34: Piano immagine, piano oggetto, centro di presa, raggi omologhi, stella di direzioni.	71
Figura 35: Parametri di orientamento interno, parametri di orientamento esterno, coordinate immagine e oggetto.	72
Figura 36:Fattore di scala, , quota di volo e distanza focale.	73
Figura 37: Esempio di marker utilizzato per il monitoraggio del ghiacciaio del Rutor.....	75
Figura 38: Esempio di curva di distorsione e Distorsion plot elaborate con il software Metashape.	76
Figura 39: Fotogramma, Fotopiano, e rappresentazione dell’operazione di ortoproiezione.	77
Figura 40: Aereo utilizzato dall’azienda Digisky per l’acquisizione dei dataset fotogrammetrici.....	78
Figura 41: Strumentazione installata sul veivolo Digisky e geometrie per la rototraslazione dei dati misurati nel centro di presa della camera	79
Figura 42: Camera Phase One iMX-RS150F	79
Figura 43: Esempio di traiettoria di volo elaborata con tecnica nRTK utilizzando la stazione base Rumiod della rete interregionale SPIN3	81
Figura 44: DSM 2020.....	82

Figura 45: Ortomosaico 2020	83
Figura 46: DSM 2021	84
Figura 47: Ortomosaico 2021	85
Figura 48: DSM 2022	86
Figura 49: Ortomosaico 2022	87
Figura 50: DSM 2023	88
Figura 51: Ortomosaico 2023	89
Figura 52: DSM 2024	90
Figura 53: Ortomosaico 2024	91
Figura 54: Profili tracciati per l'analisi del ghiacciaio del Rutor, ortogonali e trasversali all'asse vallivo. La progressione longitudinale dei seguenti profili è rappresentata nella direzione A-B .	94
Figura 55: Profilo 1, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	96
Figura 56: Profilo 1, ingrandimento sulle linee di equilibrio.....	96
Figura 57:Differenze di quota del Profilo 1, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024.....	97
Figura 58: Profilo 2, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	98
Figura 59: Differenze di quota del Profilo 2, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024.....	98
Figura 60: Profilo 3, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	100
Figura 61: Differenze di quota del Profilo 3, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024.....	100
Figura 62: Profilo 4, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	102
Figura 63: Differenze di quota del Profilo 4, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024....	102
Figura 64: Profilo 5, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	104
Figura 65: Differenze di quota del Profilo 5, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024.....	104
Figura 66: Profilo 6, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	106
Figura 67: Differenze di quota del Profilo 6, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024....	106
Figura 68: Profilo 7, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	108
Figura 69: Differenze di quota del Profilo 7, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024....	108
Figura 70: Profilo 8, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	110
Figura 71: Differenze di quota del Profilo 8, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024. Nella parte centrale sono visibili le fluttuazioni dovute alla presenza dei crepacci.	111
Figura 72: Profilo 9, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	112
Figura 73: Differenze di quota del Profilo 9, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024....	112
Figura 74: Profilo 10, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	114
Figura 75: Differenze di quota del Profilo 10, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024...	114
Figura 76: Profilo 11, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	116

Figura 77: Differenze di quota del Profilo 11, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024 ...	116
Figura 78: Profilo 12, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	118
Figura 79: Differenze di quota del Profilo 12, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024..	118
Figura 80: Profilo 13, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	120
Figura 81: Differenze di quota del Profilo 13, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024...	120
Figura 82: Profilo 14, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	122
Figura 83: Differenze di quota del Profilo 14, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024...	123
Figura 84: Profilo 15, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	124
Figura 85: Differenze di quota del Profilo 15, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024...	124
Figura 86: Profilo 16, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	126
Figura 87: Differenze di quota del Profilo 16, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024..	126
Figura 88: Profilo 17, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	128
Figura 89: Differenze di quota del Profilo 17, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024...	128
Figura 90: Profilo 18, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	130
Figura 91: Differenze di quota del Profilo 18, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024..	130
Figura 92: Profilo 19, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	132
Figura 93: Differenze di quota del Profilo 19, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024...	132
Figura 94: Profilo 20, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024	134
Figura 95: Differenze di quota del Profilo 20, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024...	134
Figura 96: Pdf e Cdf di una variabile casuale X	138
Figura 97: Distribuzione normale o gaussiana.....	141
Figura 98: Aree stabili vicine e lontane dai GCPs	149
Figura 99: Indice di correlazione tra i DSMs al variare del livello di significatività alpha applicato al DoD 2020-2021.....	152
Figura 100: DN appartenenti ai DSMs 2020-2021	152
Figura 101: Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2020-2021	153
Figura 102:Figura sinistra: Rappresentazione dei DN esclusi dal calcolo perché nelle code della distribuzione 2020-2021; Figura destra: Curva di frequenza del DoD senza le code (soglia 5%) 2020-2021.....	153
Figura 103: Indice di correlazione tra i DSMs al variare del livello di significatività alpha applicato al DoD 2021-2022.....	156

Figura 104 Figura sinistra: Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2021-2022 Figura destra : DN esclusi dal calcolo 2021-2022	156
Figura 105: Figura sinistra: Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2022-2023 Figura destra: Curva di frequenza del DoD senza le code 2022-2023	158
Figura 106: Indice di correlazione tra i DSMs al variare del livello di significatività alpha applicato al DoD. 2023-2024.....	159
Figura 107: Figura sinistra: Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2023-2024 Figura destra : DN esclusi dal calcolo 2023-2024	159
Figura 108: Pixels esclusi al variare di alpha (10,15,20) e rispettiva percentuale rispetto al numero totale.....	161
Figura 109 : Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code	162
Figura 110 Ortofoto della frana di scivolamento planare con rappresentazione del profilo e dimensioni.....	163
Figura 111 Figura sinistra: Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2020 2021 Figura destra: DN appartenenti ai DSMs 2020-2021	164
Figura 112: Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2021-2022.....	165
Figura 113: Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2021-2022.....	166
Figura 114 Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2023-2024.....	167
Figura 115: A sinistra i valori non inclusi nel calcolo con la sola soglia statistica, a destra i valori esclusi con le condizioni di soglia e quota che permette di escludere solo le variazioni indotte dai crepacci e non quelle delle fronti glaciali.	181
Figura 116: DoD e Curva di frequenza empirica senza l'imposizione di soglie.....	183
Figura 117: Curva di frequenza empirica delle variazioni di quota (DN DoD) con l'applicazione delle soglie e inclusione dei dati del fronte (cerchi rossi);In bianco su sfondo nero i pixel del DoD esclusi con l'imposizione delle soglie.....	183

Figura 118: In blu media e deviazione standard della variazione di altezza e volume dei pixels rappresentati la stessa quota. In rosso l'area del ghiacciaio al variare della quota	184
Figura 119: DoD e Curva di frequenza empirica senza l'imposizione di soglie.....	185
Figura 120: Curva di frequenza empirica delle variazioni di quota (DN DoD) con l'applicazione delle soglie e inclusione dei dati del fronte (cerchi rossi);In bianco su sfondo nero i pixel del DoD esclusi con l'imposizione delle soglie.....	185
Figura 121: In blu media e deviazione standard della variazione di altezza e volume dei pixels rappresentati la stessa quota. In rosso l'area del ghiacciaio al variare della quota	186
Figura 122: DoD e Curva di frequenza empirica senza l'imposizione di soglie.....	187
Figura 123: Curva di frequenza empirica delle variazioni di quota (DN DoD) con l'applicazione delle soglie e inclusione dei dati del fronte (cerchi rossi);In bianco su sfondo nero i pixel del DoD esclusi con l'imposizione delle soglie.....	187
Figura 124: In blu media e deviazione standard della variazione di altezza e volume dei pixels rappresentati la stessa quota. In rosso l'area del ghiacciaio al variare della quota	188
Figura 125: DoD e Curva di frequenza empirica senza l'imposizione di soglie.....	189
Figura 126: Curva di frequenza empirica delle variazioni di quota (DN DoD) con l'applicazione delle soglie e inclusione dei dati del fronte (cerchi rossi);In bianco su sfondo nero i pixel del DoD esclusi con l'imposizione delle soglie.....	189
Figura 127: In blu media e deviazione standard della variazione di altezza e volume dei pixels rappresentati la stessa quota. In rosso l'area del ghiacciaio al variare della quota	190
Figura 128: Confronto delle medie di variazione di altezza al variare della quota nel quinquennio 2020-2024.....	192
Figura 129: Confronto delle variazione di altezza e volume al variare della quota nel quinquennio 2020-2024.....	192
Figura 130: Tracciamento dei perimetri da prodotti fotogrammetrici Digisky	195
Figura 131: Tracciamento dei perimetri dal LIA al 2024.....	197
Figura 132: Rappresentazione grafica del confronto tra il LIA e il 2024, variazione areale cumulata in rosso, in blu l'area del ghiacciaio nei vari anni.....	199
Figura 133: Rappresentazione grafica del confronto tra il LIA e il 2024, differenza annuale e variazione annuale % in rosso, in blu l'area del ghiacciaio nei vari anni	200
Figura 134: Profili per il calcolo della velocità di ritiro di tutto il fronte.	202
Figura 135: Profili per il calcolo della velocità di ritiro del fronte sinistro.	203
Figura 136: Profili lungo il fronte sinistro/occidentale	204

Figura 137: Risultati del calcolo di ritiro del fronte sinistro del ghiacciaio con entrambi i metodi.	204
Figura 138: Profili per il calcolo della velocità di ritiro del fronte destro.	205
Figura 139: Profili lungo il fronte destro/orientale	206
Figura 140: Risultati del calcolo di ritiro del fronte destro del ghiacciaio con entrambi i metodi.	206
Figura 141: Risultati del calcolo di ritiro di tutto il fronte del ghiacciaio con entrambi i metodi.	207
Figura 142: Linee di equilibrio 2020-2021, 2022-2023, 2023-2024.	209
Figura 143: Media della quota dei pixel al variare della quota con estrazione delle quote di media pari a 0.....	210
Figura 144: DoD 2020-2021 con la linea di equilibrio calcolata mediante Qgis	211
Figura 145: Profilo della linea d’equilibrio sul DSM più recente, tracciata con Qgis.....	211
Figura 146: DoD 2020-2021 con la linea di equilibrio calcolata mediante Qgis	212
Figura 147: DoD 2022-2023 con la linea di equilibrio calcolata mediante Qgis	213
Figura 148: Profilo della linea d’equilibrio sul DSM più recente, tracciata con Qgis.....	213
Figura 149: DoD 2023-2024 con la linea di equilibrio calcolata mediante Qgis	214
Figura 150: Profilo della linea d’equilibrio sul DSM più recente, tracciata con Qgis.....	215
Figura 151: Aree selezionate su Vedette, 2024 con neve, 2023 senza neve.....	216
Figura 152: Andamento delle temperature giornaliere scaricate mediante il modello ERA5 su tutto il quinquennio	217
Figura 153: Confronto degli andamenti annuali delle temperature giornaliere scaricate mediante il modello ERA5 durante il quinquennio	218
Figura 154: Confronto degli andamenti estivi delle temperature giornaliere scaricate mediante il modello ERA5 durante il quinquennio	219
Figura 155: Rappresentazione del movimento dei crepacci mediante l’utilizzo dei DSMs e DoD. I valori del DoD nella sezione B sono positivi, i valori del DoD nella sezione C sono negativi..	222
Figura 156: Istogramma cumulato della differenza tra DSMs, con soglie per la rappresentazione del crepaccio nella posizione iniziale e finale. Sono rappresentate in blu le sezioni spiegate nella Figura 155.	223
Figura 157: Rappresentazione binaria del crepaccio nella posizione iniziale (Sezione B) e finale (Sezione C) mediante le due immagini di lavoro generate dal DoD. Il riquadro rosso rappresenta la matrice sagoma, il riquadro blu rappresenta la matrice bersaglio.....	224

Figura 158: Ortofoto 2022 e 2023, e rappresentazione dei crepacci mediante soglie applicate al DoD, per la stima degli spostamenti di un solo crepaccio.	225
Figura 159: Ortofoto 2022 e 2023, e rappresentazione dei crepacci mediante soglie applicate al DoD, per la stima degli spostamenti dei 3 crepacci.	225
Figura 160: Passaggi del programma implementato su Matlab	226
Figura 161: Prima immagine bersaglio 1 bit identificata dal programma nel processo di traslazione della matrice sagoma.....	227
Figura 162: Ultima immagine bersaglio 1 bit identificata dal programma nel processo di traslazione della matrice sagoma.....	227
Figura 163 : Passaggi dell’algoritmo di autocorrelazione a pixel intero implementato su Matlab e applicato al caso dei crepacci.	228
Figura 164: Immagine Sagoma 8 bit per l’identificazione del crepaccio nella posizione iniziale	229
Figura 165: Rappresentazione binaria del crepaccio nella posizione iniziale (di partenza) e finale (di ricerca).	231
Figura 166: Immagine Sagoma per l’identificazione del crepaccio nella posizione iniziale	231
Figura 167: Prova 1: spostamenti su immagini 1 bit.....	231
Figura 168: Prova 1: spostamenti su immagini 8 bit.....	232
Figura 169: Immagine Sagoma per l’identificazione del crepaccio nella posizione iniziale	233
Figura 170: Prova 2: spostamenti su immagini 1 bit.....	233
Figura 171: Prova 2: spostamenti su immagini 8 bit.....	233
Figura 172: Immagine Sagoma per l’identificazione del crepaccio nella posizione iniziale	234
Figura 173: Prova 3: spostamenti su immagini 1 bit.....	234
Figura 174: Prova 3: spostamenti su immagini 8 bit.....	234
Figura 175: Rappresentazione binaria del crepaccio nella posizione iniziale (di partenza) e finale (di ricerca).	236
Figura 176: Immagini Sagoma per l’identificazione dei crepacci nella posizione iniziale	237
Figura 177: Spostamenti su immagini 1 bit	237
Figura 178: Spostamenti su immagini 8 bit	237

Indice delle tabelle

1. IL CAMBIAMENTO CLIMATICO

1.1. Introduzione al cambiamento climatico

Con il termine «**cambiamento climatico**» si identificano le variazioni a lungo termine delle temperature, delle condizioni metereologiche e dei sistemi naturali che costituiscono il pianeta Terra.

Il clima, per sua natura, non è costante ma varia nel tempo e il cambiamento climatico è un fenomeno globale che si manifesta in modo diverso nelle diverse regioni che lo compongono.

Il cambiamento climatico genera in tutto il mondo eventi metereologici e climatici estremi. Ciò comporta forti ripercussioni sugli ecosistemi naturali, sulla sicurezza alimentare ed idrica, sulla salute umana, sulle economie, sulle società e popolazioni in ogni area del globo. Inoltre le comunità che storicamente hanno meno contribuito sono sia le più vulnerabili che le più colpite da questi fenomeni (IPCC AR6, 2023).

Comprendere la variabilità del clima è importante per mitigare i rischi climatici e adattarsi ad essi. (Mazzoglio, 2025).

1.2. Riscaldamento globale

È noto che la **temperatura media globale** sia in continuo aumento e che dal 1970 la crescita si sia incrementata maggiormente rispetto a qualsiasi intervallo temporale di 50 anni negli ultimi 2000 anni. Nel periodo 2011-2020 si è registrato un aumento di circa 1,1°C rispetto alla fascia temporale 1850-1900 (1,09°C [0,95–1,20°C]), con un aumento maggiore sulla terraferma (1,59°C [1,34–1,83°C]) rispetto agli oceani (0,88°C [0,68–1,01°C]). L'ultima fase di riscaldamento comparabile a quella odierna si è verificata circa 125.000 anni fa, ma è importante ricordare che i periodi caldi passati furono causa di variazioni orbitali millenarie, a differenza del riscaldamento globale attuale di origine antropica (figura 1). (IPCC AR6, 2023)

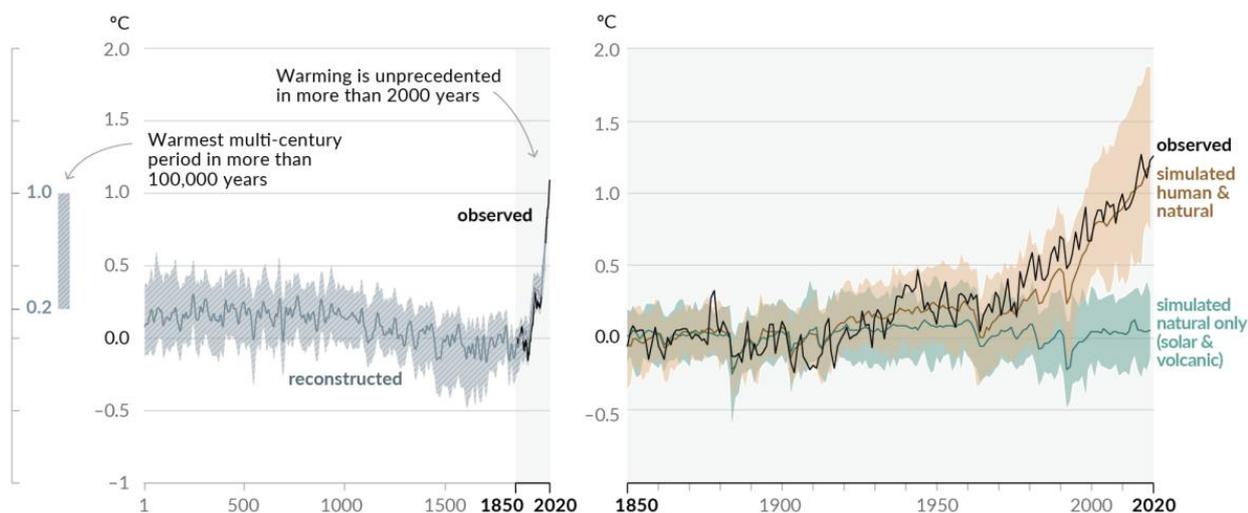
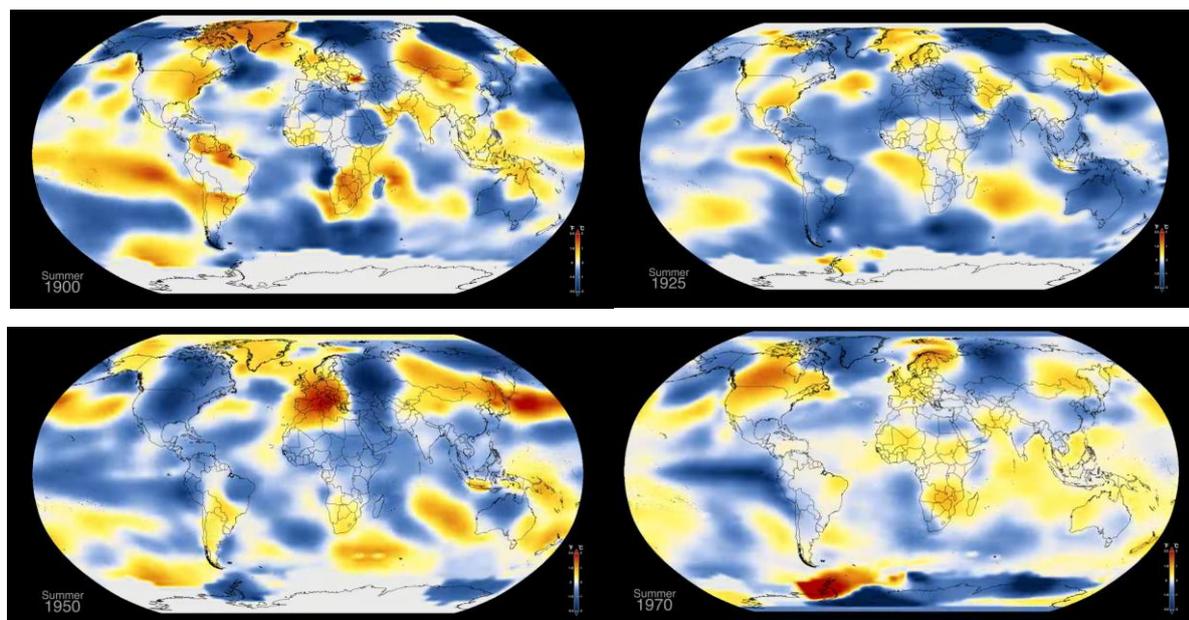


Figura 1: Andamento del riscaldamento globale dall'anno 1 al 2020 e confronto tra l'andamento reale e l'andamento simulato senza l'impatto delle attività antropiche. (IPCC - AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023)

Un indice fortemente utilizzato per la rappresentazione dell'aumento delle temperature è “l’anomalia di temperatura mensile”, calcolata come la differenza del valore registrato e il valore medio del periodo temporale di riferimento. Nelle figure 2 e 3 è rappresentata l’anomalia di temperatura del mese di agosto e successivamente quella mensile di tutto l’anno, pubblicate dal GISS (NASA’s Goddard Institute of Space Studies). Il lasso di tempo preso in analisi è tra il 1880 e il 2023 rispetto al periodo di riferimento 1951 – 1980. Dalle figure è evidente che l’aumento di temperatura è distribuito su tutti i mesi dell’anno e in tutto il globo.



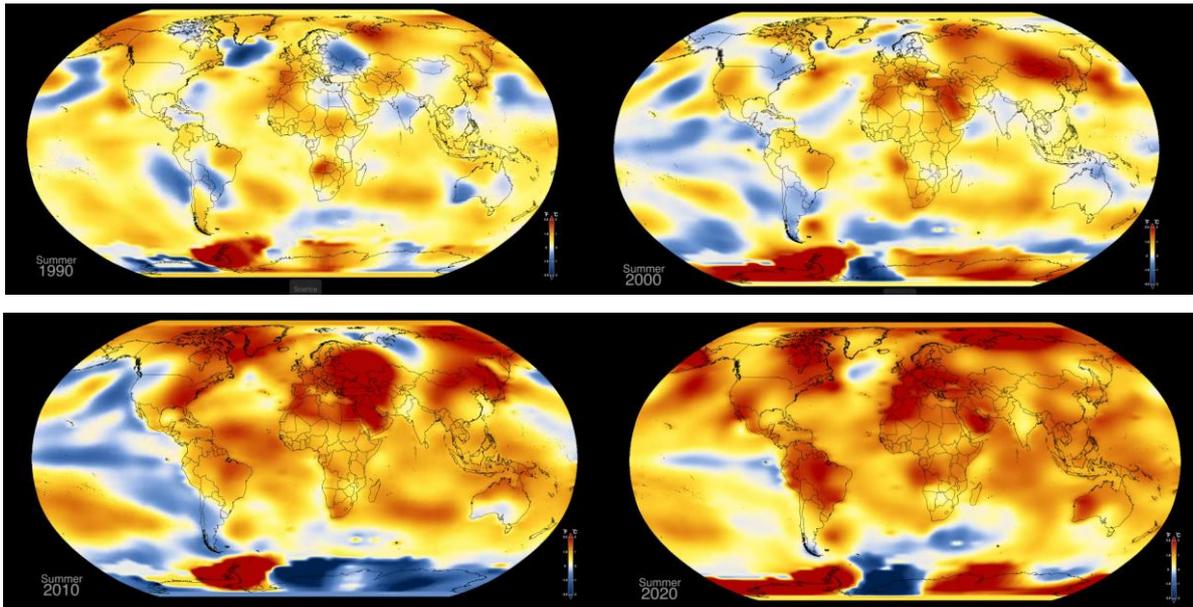


Figura 2: Anomalia di temperatura del periodo 1880 – 2023 rispetto al periodo di riferimento 1951 – 1980 pubblicata dal GISS (NASA's Goddard Institute of Space Studies)

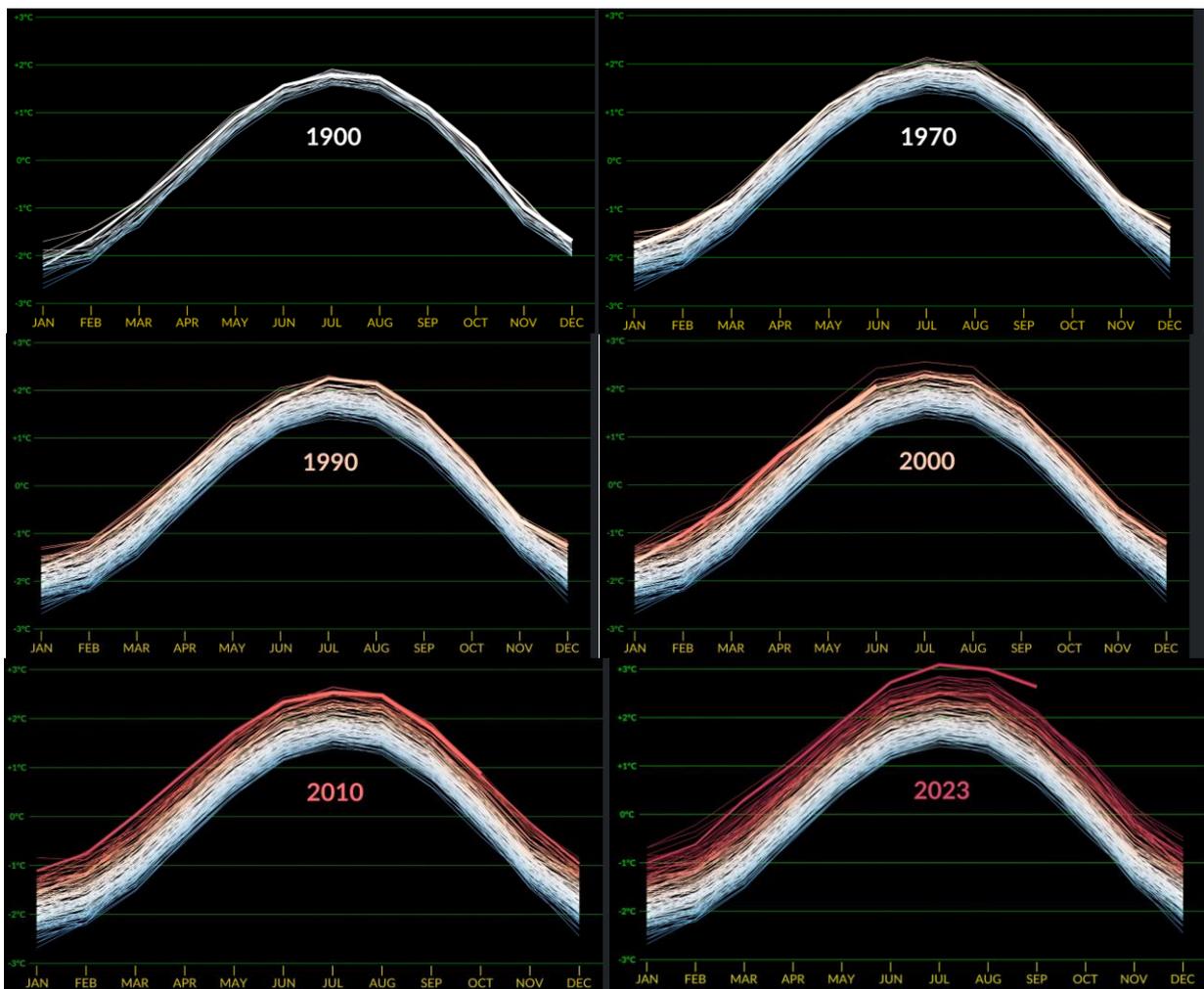


Figura 3: Anomalia di temperatura mensile del periodo 1880 – 2023 rispetto al periodo di riferimento 1951 – 1980 pubblicata dal GISS (NASA's Goddard Institute of Space Studies)

1.3. Attività umana e cause specifiche del riscaldamento

Studi focalizzati sul rilevamento e attribuzione del cambiamento climatico, basati su modelli climatici e osservazioni, mostrano che dalla metà del XIX secolo, le attività umane, principalmente con la continua emissione di gas serra e del correlato “effetto serra”, stanno inequivocabilmente e irreversibilmente causando il riscaldamento globale del pianeta. (IPCC AR6, 2023).

L’**effetto serra** è un fenomeno fisico per cui la radiazione emessa dalla superficie terrestre non riesce ad allontanarsi dal globo, ma viene riassorbita dai gas serra che a loro volta le riemettono in direzione della superficie terrestre provocando un aumento delle temperature (figura 4).

Le emissioni globali di “GHG” (Greenhouse Gases o gas serra) sono aumentate fortemente dal 1850 e specialmente tra il 2010 e il 2019 (figura 5). Sono principalmente causate dalla crescita delle attività nei settori industriali, ai modelli di consumo, produzione e trasporto adottati, ad un utilizzo insostenibile dell’energia e dell’uso del suolo. Le maggiori emissioni sono attribuite alle aree urbane, con una continua crescita (dal 62% al 67-72% della quota globale) tra il 2015 e il 2020, e fortemente correlate alla densità demografica, all’assetto urbano, al reddito medio, al livello culturale e di sensibilizzazione nei confronti dell’ambiente. (IPCC AR6, 2023)

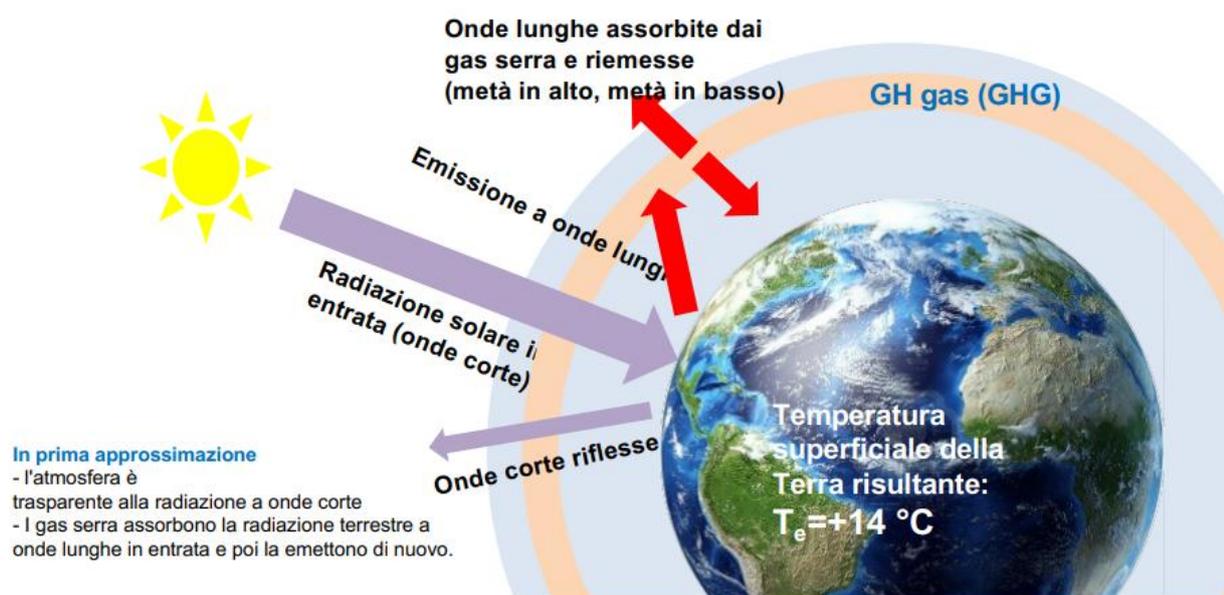


Figura 4: Fenomeno dell’effetto serra, dalla radiazione solare alle onde lunghe assorbite e riemesse dai GHG

I gas serra sono composti in prevalenza da:

- CO₂ con origine da: combustibili fossili 34%, processi industriali 24%, settore AFOLU (Agricoltura, Foreste, Allevamento, Uso del suolo) 22%, trasporti 15%, edilizia 6%
- CH₄ (Metano)
- N₂O (Protossido di azoto)
- HFCs, PFCs, SF₆, NF₃ (Gas Fluorurati) (IPCC AR6, 2023)

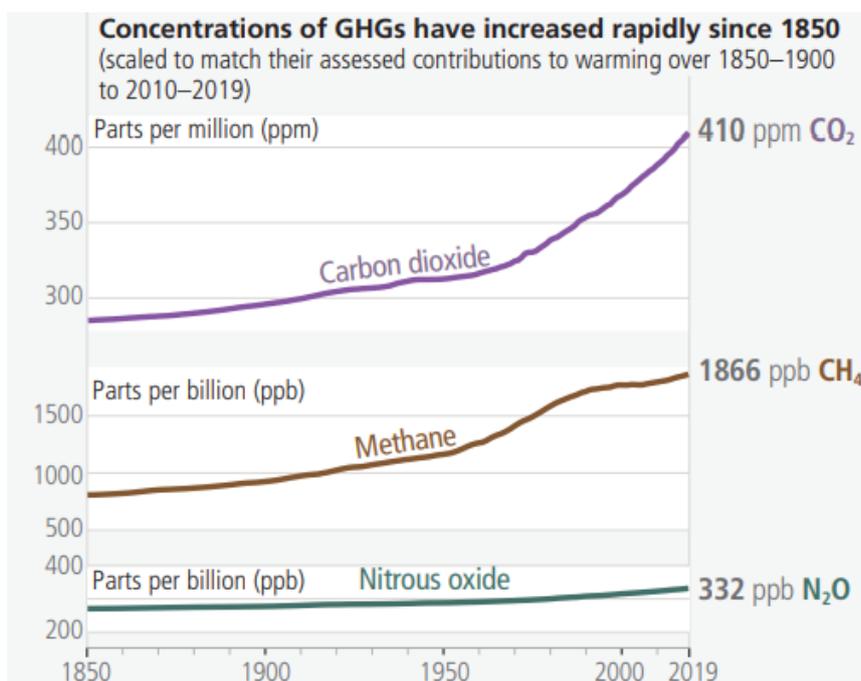


Figura 5: Andamento delle concentrazioni dei GHG in atmosfera dal 1850 al 2019. (IPCC AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023)

1.4. L'impatto del cambiamento climatico sul globo

È indiscutibile che atmosfera, oceano, criosfera e biosfera siano soggetti a modifiche radicali e senza precedenti, dovute a cambiamenti climatici diffusi su tutto il globo. (IPCC AR6, 2023)

Eventi meteorologici estremi si stanno verificando in ogni regione del mondo (figura 6): ondate di calore, precipitazioni intense, siccità e cicloni tropicali sono sempre più frequenti. È aumentata fortemente la variabilità delle temperature, gli estremi di calore si verificano sempre con più facilità dagli anni '50, mentre gli estremi di freddo sono diventati meno frequenti ma non meno intensi. Inoltre, è importante considerare la correlazione tra questi fenomeni, poiché l'aumento di uno determina anche la crescita degli altri. (IPCC AR6, 2023)

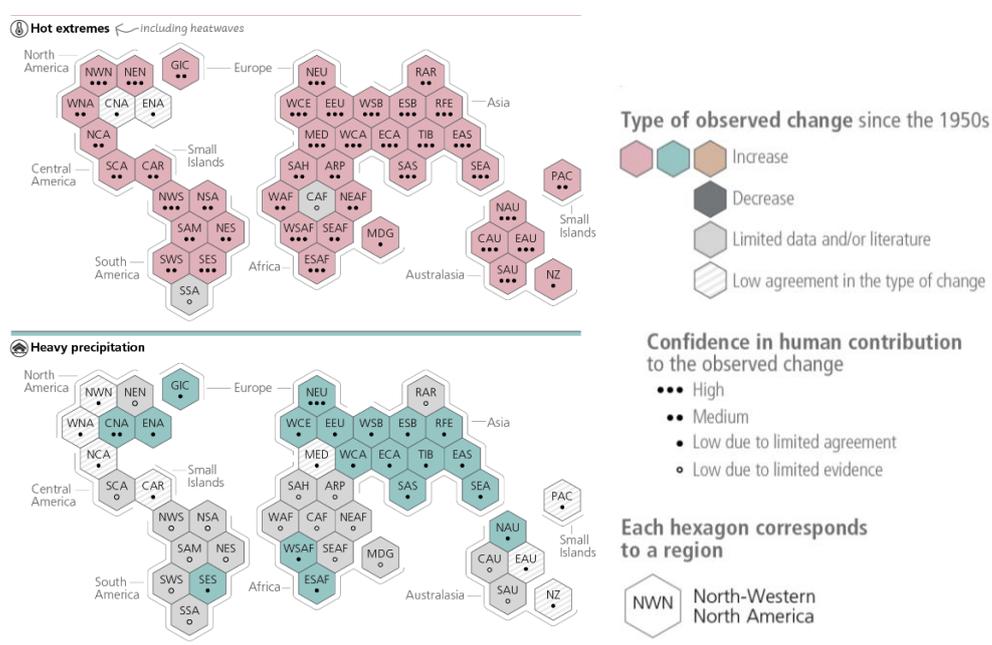


Figura 6: Regioni del globo in cui si è manifestato un incremento delle ondate di calore e delle precipitazioni estreme, e la confidenza nella rappresentazione dei risultati. (IPCC AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023)

Forti **fenomeni precipitativi** sono associati ai cicloni tropicali ed alle ondate di calore marine, raddoppiate in frequenza dagli anni '80, e l'influenza umana ne è probabilmente la causa, almeno dal 2006. La proporzione globale dei cicloni tropicali di grande intensità (Categorie 3-5) è aumentata negli ultimi quattro decenni e la frequenza ed intensità degli eventi di precipitazioni intense sono aumentate dagli anni '50. (IPCC AR6, 2023)



Figura 7: “Le ondate di calore e le tempeste tropicali possono rendere più potenti gli uragani, un fenomeno acuito dal riscaldamento globale. Nel 2017 su Puerto Rico si è abbattuto l’uragano Maria, che ha inflitto all’isola un danno senza precedenti nella storia. Oltre 3.000 persone sono morte a causa di questo uragano di categoria 5, che ha causato circa 90 miliardi di dollari (quasi 78 miliardi di euro) di danni a innumerevoli coltivazioni, case e infrastrutture fondamentali per la sanità e l’irrigazione. Anche dal punto di vista emotivo fu una catastrofe: nei tre mesi successivi all’uragano i tentati suicidi sono triplicati tra gli abitanti, che non riuscivano a rimettere insieme i pezzi della propria vita. Nella foto, la luce dell’alba illumina quello che resta di un’abitazione a Playa El Negro, cinque mesi dopo l’uragano Maria.” (FOTOGRAFIA DI CAROL GUZY, NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION)

Siccità agricole ed ecologiche sono in costante aumento a causa dell’incremento dell’evapotraspirazione terrestre. I processi di desertificazione hanno aggravato il degrado del suolo, in particolare nelle aree costiere, nei delta fluviali, nelle terre aride e nelle aree di permafrost. Negli ultimi 100 anni le attività umane locali, l’innalzamento del livello del mare, l’evoluzione degli eventi estremi e il riscaldamento globale hanno diminuito quasi del 50% le zone contraddistinte da un clima umido. Incendi boschivi sono sempre più diffusi in molte regioni del globo e hanno influenzato negativamente grossi ecosistemi, beni costruiti, infrastrutture, attività economiche e la salute delle persone e della flora e fauna endemici di quei territori. (IPCC AR6, 2023)



Figura 8 : "Il Lago di Urmia è un enorme lago iraniano ipersalino che è stato vittima di una serie di impatti negativi. L'evaporazione causata dal riscaldamento e il saccheggio delle sue acque per l'irrigazione hanno portato alla perdita del 90% del suo volume, tra il 1995 e il 2013. Gran parte di questo specchio d'acqua è oggi un deserto salato, e gli scienziati temono che il lago possa scomparire del tutto, se non vengono adottate misure drastiche di risparmio idrico." (FOTOGRAFIA DI NEWSHA TAVAKOLIAN, NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION)

Gli **ecosistemi** terrestri d'acqua dolce, criosferici, costieri e oceanici stanno subendo danni significativi e perdite sempre più irreversibili. Circa la metà delle specie viventi migrano verso i poli a causa delle variazioni climatiche e dell'aumento di temperature, che rendono le latitudini maggiori più adatte alla loro sopravvivenza. Inoltre la magnitudine degli eventi estremi di calore stanno provocando l'estinzione di centinaia di specie locali, e l'impatto sugli ecosistemi montani ed artici sta raggiungendo l'irreversibilità, in particolare per i cambiamenti idrologici derivanti dal ritiro dei ghiacciai e dalla degradazione del permafrost. (IPCC AR6, 2023)



Figura 9 : "Foto di un orso polare magro ed emaciato, in cattive condizioni di salute, catturata e postata su Facebook dalla fotografa Kerstin Langenberger al largo del Mare di Barents, nell'arcipelago Norvegese delle Svalbard. Sul suo sito, la reporter spiega che quella ritratta nello scatto è «una femmina,

quasi uno scheletro, con una zampa anteriore ferita, intenta forse a cacciare un tricheco, mentre è bloccata a terra». Per Langenberger, a ridurre così l'animale è stato il riscaldamento globale, che sta cancellando i ghiacci marini, piattaforma di caccia degli orsi bianchi, a tempo record” (Rivista Focus)

Il cambiamento dei modelli di precipitazione, la riduzione delle riserve idriche solide e la diminuzione di precipitazioni di basse entità sta rendendo sempre più precaria **la sicurezza della risorsa idrica ed alimentare**, ostacolando così gli sforzi per raggiungere gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (OSS) o Sustainable Development Goals (SDGs) introdotti dalle Nazioni Unite (ONU). Sebbene la produttività agricola mondiale sia aumentata per sostenere la domanda sempre più in crescita, il cambiamento climatico ne sta ostacolando lo sviluppo. Le regioni situate a latitudini medie e basse sono le più vulnerabili agli impatti negativi, mentre le aree ad alta latitudine stanno sperimentando un progressivo innalzamento delle temperature, con climi sempre più simili a quelli tropicali. Non solo il comparto agricolo ne è fortemente influenzato, ma anche il settore ittico è soggetto ad una continua diminuzione del potenziale di cattura massima, aggravando le conseguenze della pesca intensiva di alcune risorse acquatiche. La produzione alimentare di molluschicoltura e della pesca oceanica è negativamente influenzata sia dal riscaldamento degli oceani che dalla loro acidificazione. (IPCC AR6, 2023)

Il **riscaldamento degli oceani** e specialmente la fascia superiore (0-700m) ha rappresentato il 91% del riscaldamento del sistema climatico. Il riscaldamento terrestre, la perdita di ghiaccio e il riscaldamento atmosferico hanno rappresentato rispettivamente circa il 5%, il 3% e l'1%(IPCC AR6, 2023)



Figura 10: “L’aumento della temperatura del mare altera le condizioni ambientali rendendole intollerabili per i coralli che non riescono a sopravvivere. Le barriere coralline, un ecosistema vitale che ospita innumerevoli specie, sono fortemente in pericolo: le ricerche presentate nel 2020 indicano che

entro il 2040 saranno morte tra il 70% e il 90% delle barriere coralline del mondo. Questi habitat vivono in un delicato rapporto di simbiosi con le alghe che forniscono loro le sostanze nutritive di cui hanno bisogno. Se la temperatura aumenta troppo, queste alghe, chiamate zooxantelle, non possono colonizzare i coralli, e le strutture di carbonato di calcio si “decolorano”. In questa foto il fotografo David Doubilet mostra il contrasto tra una Opal Reef (nella Grande barriera corallina australiana) in buona salute nel 2010, rispetto alla situazione nel 2019. Il danno è stato probabilmente causato da un picco nell’aumento della temperatura dell’oceano avvenuto nel 2016.” (FOTOGRAFIA DI DAVID DOUBILET, NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION)

Le **terre aride** sono sempre più inclini ad una maggiore scarsità d’acqua. Circa la metà della popolazione mondiale attualmente ne sperimenta una grave carenza nei periodi più caldi dell’anno, in particolare per le piccole comunità indigene a basso reddito residenti in Africa, Asia, America Centrale e Meridionale, nei Paesi meno sviluppati (LDC), nelle Piccole Isole e nell’Artico. Ciò non è dovuto solamente al cambiamento climatico, ma anche all’espansione agricola insostenibile e alla competizione mondiale per le risorse alimentari, dovute a diete squilibrate dei paesi più sviluppati e ricchi. (IPCC AR6, 2023)

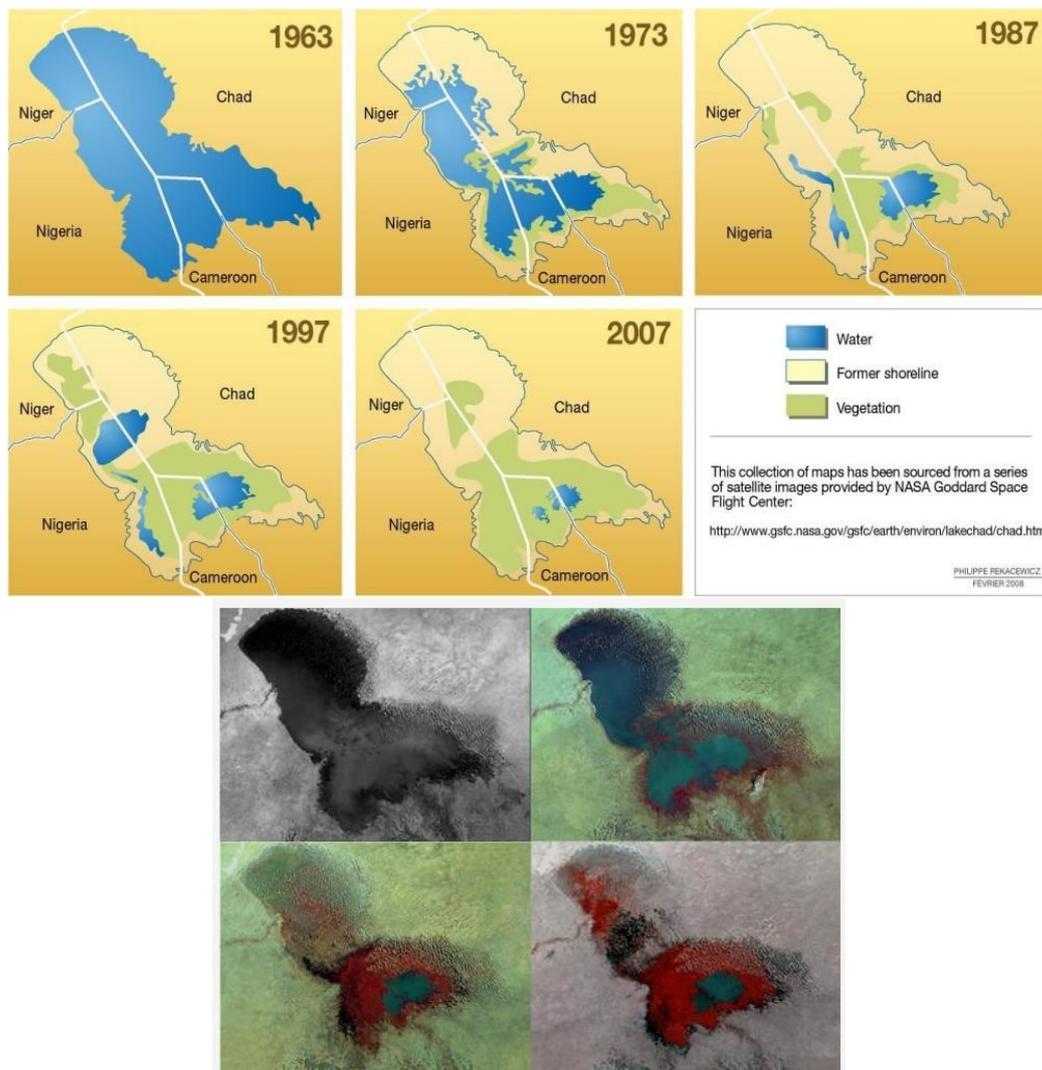


Figura 11: Il Lago Ciad, fonte di risorsa alimentare e idrica indispensabile per le popolazioni locali, situato nella parte centro-settentrionale dell’Africa, sui confini di Ciad, Camerun, Niger e Nigeria,

nell'area del Sahel, si è ridotto di oltre il 90 % negli ultimi decenni. In figura immagini satellitari acquisite dal servizio Landsat NASA.

Nei contesti urbani, la salute umana, i mezzi di sussistenza e le infrastrutture chiave sono fortemente interessati dal cambiamento climatico. Nelle città le ondate di calore e gli eventi climatici estremi si sono intensificati peggiorando la qualità dell'aria ed esaltando le criticità delle infrastrutture strategiche. Sistemi di trasporto e movimentazione della popolazione, acqua, igiene ed energia sono state compromesse da eventi estremi difficilmente prevedibili, con conseguenti interruzioni, perdite economiche e conseguenze sul benessere sia individuale che collettivo. Salute, qualità della vita, giustizia sociale e sostenibilità economica ne sono quotidianamente compromessi. Inoltre l'impatto più grave è concentrato tra i cittadini economicamente e socialmente più emarginati, in condizioni abitative precarie, e che vivono solitamente in aree senza servizi pubblici, acqua potabile, fognature ed elettricità. (IPCC AR6, 2023)

Ad aggravare il contesto, i centri urbani intensificano le temperature perché sono centri di produzione di CO₂ e, per i materiali con cui sono costruite, si comportano come isole di calore, aumentando così anche l'intensità delle precipitazioni sopra e a valle di quest'ultime (IPCC AR6, 2023). Inoltre sono fortemente soggette a fenomeni alluvionali pluvioindotti, per la continua tendenza all'impermeabilizzazione e riduzione del suolo e per la cattiva gestione dei sistemi di drenaggio delle acque piovane.

Gli impatti economici attribuibili al cambiamento climatico sono stati rilevati nei settori più esposti al clima, con effetti sull'agricoltura, la silvicoltura, la pesca, l'energia e il turismo. Poche sono le eccezioni, alcune regioni con bassa domanda energetica ed esposte ad un miglioramento del contesto climatico per l'aumento delle temperature si sono viste soggette a vantaggi nei mercati agricoli e nel turismo. Rimangono comunque casi isolati e scarsamente diffusi. (IPCC AR6, 2023)

Non solo la salute fisica delle popolazioni è stata fortemente condizionata ma anche quella mentale, causando crisi umanitarie diffuse e aumentando la vulnerabilità delle comunità più a rischio. Eventi di calore estremo hanno portato ad un aumento della mortalità e ad una maggiore diffusione ed incidenza di malattie correlate all'alimentazione e alla risorsa idrica.



Figura 12: L'isola caraibica di Haiti è stata martoriata da una serie di disastri naturali, che si sono aggiunti all'instabilità politica e alla povertà. Nell'estate 2021, il Paese ha vissuto un terremoto di magnitudo 7.2, la tempesta tropicale Grace e l'assassinio del proprio presidente, tutto nell'arco di un periodo di sei settimane. Gli eventi climatici estremi hanno reso intollerabili le condizioni di vita già precarie. Questa foto aerea rappresenta la devastazione a Jérémie, ad Haiti, dopo l'uragano di categoria 4.(FOTOGRAFIA DI LOGAN ABASSI, UN MINUSTAH, NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECTION)

Nelle regioni analizzate, i maggiori traumi sono associati a temperature crescenti, agli eventi estremi, alla perdita di mezzi di sussistenza e alle perdite culturali. Oltretutto è importante ricordare che gli impatti del cambiamento climatico sulla salute sono fortemente moderati dalle condizioni sociali ed economiche della popolazione soggetta. Gli estremi climatici e metereologici stanno sempre più allontanando le popolazioni Africane, Asiatiche, dell'America Centrale e Meridionale dalle loro terre d'origine, provocando un incremento dei processi migrativi ed accentuando le vulnerabilità con l'aumento delle disuguaglianze, divergenze sociali ed inequità di genere. La dissociazione e perdita di identità culturale minacciano la capacità di adattamento di suddette popolazioni e potrebbero comportare perdite irreversibili del senso di appartenenza e legame con le proprie origini, dalle pratiche culturali distintive di ogni popolo all'identità di ciascun individuo. Circa 3,6 miliardi di persone vivono in contesti altamente vulnerabili al cambiamento climatico, tra il 2010 e il 2020, la mortalità umana a causa di alluvioni, siccità e tempeste è stata 15 volte più alta nelle regioni altamente vulnerabili. (IPCC AR6, 2023)

Non solo le popolazioni delle basse latitudini subiscono gravi impatti sui mezzi di sussistenza e sull'identità culturale che li rende unici. Anche gli abitanti dell'Artico, con i cambiamenti nella copertura nevosa, nel ghiaccio dei laghi e dei fiumi e nel permafrost ne sono fortemente

compromessi, comprese le popolazioni indigene che da sempre sono state in grado di sopravvivere alle condizioni estreme che identificano quelle aree. (IPCC AR6, 2023)

L'influenza umana è con alta probabilità il principale ragione e motore del **ritiro globale dei ghiacciai** dagli anni '90 e della riduzione della superficie del ghiaccio marino artico tra il 1979-1988 e il 2010-2019. (IPCC AR6, 2023)



Figura 13: Sinistra : “Il riscaldamento globale minaccia alcune modalità di vita e sussistenza che esistono da secoli. Nella foto, un giovane cacciatore di balene sistema la carne nella “cantina” di permafrost di famiglia, a Barrow, in Alaska. Questo sistema di raffreddamento naturale viene compromesso dallo scioglimento del permafrost e dal decongelamento di terreni che sono rimasti congelati per migliaia di anni. Gli incendi in regioni prima ghiacciate, come quelli avvenuti in Siberia nel 2021, stanno bruciando e rilasciando CO₂ dalla tundra e dalla torba, gli ecosistemi più densi di carbonio al mondo.” (FOTOGRAFIA DI KATIE ORLINSKY, NATIONAL GEOGRAPHIC)

Destra: “Il ghiaccio nella Baia di Disko, in Groenlandia, luccica sotto i raggi del basso sole artico. Il ghiaccio della Groenlandia è stato oggetto di molti studi negli ultimi anni; gli scienziati prevedono che con l’attuale velocità di scioglimento andrà perso più ghiaccio in questo secolo che negli ultimi 12.000 anni. Se la calotta glaciale (una delle due del pianeta, insieme a quella antartica) si sciogliesse completamente, farebbe aumentare il livello del mare di 7,3 metri a livello globale.” (FOTOGRAFIA DI DIANE COOK E LEN JENSHIEL, NATIONAL GEOGRAPHIC IMAGE COLLECT)

Nell’arco temporale 1901-2024 si è registrato un innalzamento di 0.025m [0,022-0,029m] del livello medio globale del mare dovuto alla fusione dei ghiacciai (figura 14). Tra il 1901 e il 1971 il tasso medio di innalzamento è stato di 1,3 mm/yr [0,6-2,1 mm/yr], aumentando a 1,9 mm/yr [0,8-2,9 mm/yr] tra il 1971 e il 2006, e aumentando ulteriormente a 3,7 mm/yr [3,2-4,2 mm/yr] tra il 2006 e il 2018. Oltre all’innalzamento, un altro effetto fortemente negativo dell’attività umana dovuto alle emissioni di CO₂ è l’attuale acidificazione globale della superficie dell’oceano aperto. (IPCC CHAPTER 9, SIXTH ASSESSMENT REPORT 2021)

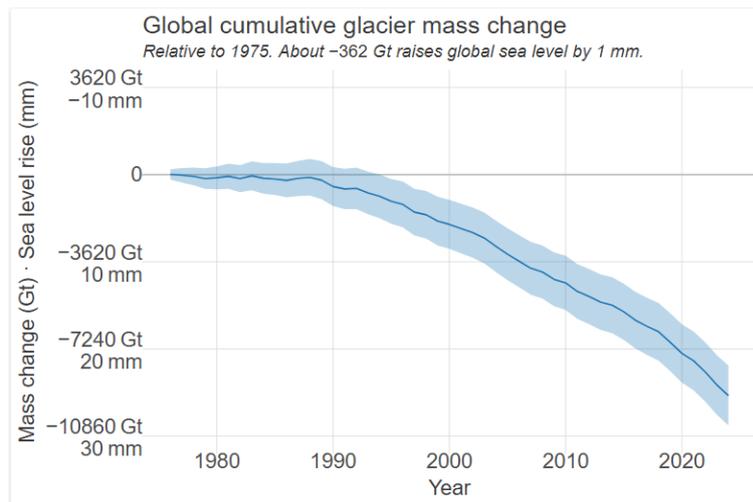


Figura 14 : Stime cumulative del cambiamento della massa dei ghiacciai globali e relativi contributi all'innalzamento del livello del mare dal 1975. I cambiamenti di massa cumulativi in Gt (1 Gt = 10¹² kg) e gli equivalenti globali dell'innalzamento del livello del mare in mm sono mostrati con le incertezze correlate a intervalli di confidenza del 95%. (WGMS- Dussailant et al. 2024)

1.5. Criosfera

Il WGMS (World Glacier Monitoring Service) definisce “**Criosfera**” come: “Il termine "criosfera" derivante dal greco *kryos*, che significa "gelo" o "freddo glaciale". Ha la funzione di descrivere collettivamente gli elementi del sistema terrestre che contengono acqua allo stato solido, per esempio: il ghiaccio marino, il ghiaccio di laghi e fiumi, il manto nevoso terrestre, le precipitazioni solide, i ghiacciai, le calotte glaciali, le calotte polari, il permafrost e il terreno che si congela stagionalmente. La criosfera è presente a tutte le latitudini e in circa un centinaio di Paesi, ha un valore socioeconomico significativo e la ricerca scientifica conferma il ruolo cruciale della criosfera sul clima”. Essa è fortemente rappresentativa del paesaggio Alpino e delle regioni di alta montagna.

Per avere una migliore comprensione dei fenomeni che interessano il paesaggio glaciale è necessario definire gli elementi più importanti che lo costituiscono:

- **Lastre di ghiaccio o calotte glaciali (*Ice sheets*)** → Gli “Ice sheets” sono corpi di ghiaccio stratificati di enormi dimensioni, con scala continentale, che scorrono nell’oceano e creati da anni di accumulo di precipitazioni solide. Possono essere spessi centinaia di metri, e le due calotte glaciali più famose ed ancora presenti sono la Groenlandia e l’Antartide, che da sola contiene il 91 % del ghiaccio d’acqua dolce del mondo. Il loro bilancio di massa è basato sugli apporti di precipitazione solida, dal distacco degli iceberg e dalla fusione delle parti laterali. Esse rappresentano un elemento chiave nello studio delle caratteristiche climatiche delle epoche passate (Hambrey, et al., 2004).
- **Ghiaccio marino (*Sea ice*)** → Le calotte di ghiaccio marino o acqua oceanica sono porzioni di acqua salata allo stato solido, possono avere spessori differenti che variano dai pochi centimetri a qualche metro, e il loro processo di fusione e solidificazione si svolge unicamente nell’oceano. Sono localizzate principalmente nell’oceano Artico e Antartico e svolgono un ruolo fondamentale sia per le popolazioni che per la fauna autoctona. Il ghiaccio marino influenza il clima terrestre ed è fondamentale per lo studio dei cambiamenti climatici.
- **Permafrost** → Il permafrost è definito come: “Terreno, suolo, roccia, ghiaccio e materiale organico che rimane sotto i 0°C per almeno due anni consecutivi”(Harris, et al., 1988). Si

noti che il permafrost è definito in base alla temperatura e non per il contenuto di ghiaccio, difatti, in alcuni casi, potrebbe esserne privo.” Ricopre circa 22.8 milioni di Km² ed è fortemente diffuso nelle regioni artiche, sub-artiche, in Antartide e sub-Antartide e nelle aree di alta montagna. La parte superiore, detta “strato attivo”, si degrada durante l’inverno e si solidifica in estate, subendo così un continuo ciclo di gelo disgelo. Il permafrost si divide in: permafrost latitudinale (alte latitudini), permafrost altitudinale (montano) e permafrost sottomarino. La sua degradazione è una delle cause più importanti dell’instabilità delle aree montane.

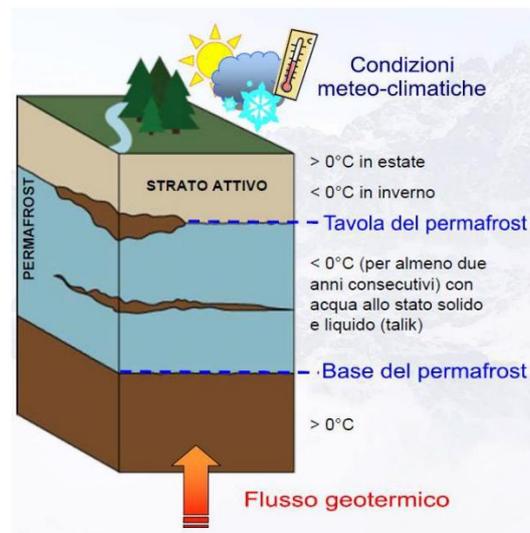


Figura 15: Esempio di Permafrost (Morfologia periglaciale, scienzanatura)

- **Ghiacciai** → L’IPCC li definisce come una massa perenne di ghiaccio, firn e neve, che ha origine sulla superficie terrestre per accumulo e compattazione delle precipitazioni solide e che mostra evidenze negli spostamenti passati o presenti. Un ghiacciaio è in continuo cambiamento, tipicamente guadagna massa per accumulo di neve e la perde per processi di fusione. La linea che separa questi due processi è detta “Linea di equilibrio”.

Essi hanno una natura stratificata, dovuta alla trasformazione della precipitazione nevosa inizialmente in neve granulare (firn) sotto forma di depositi, poi in “bubble ice” e successivamente in “ghiaccio glaciale”. Le masse glaciali durante l’ultima era glaciale coprivano circa il 32% delle terre emerse e il 30% degli oceani e se raggiungono la scala continentale (>50.000 km²) sono chiamate calotte glaciali (Cogley, et al., 2011).

1.6. Fattori atmosferici rilevanti per i cambiamenti della criosfera

Nel passato l'analisi dei fattori atmosferici è stata principalmente svolta mediante osservazioni in loco e analisi regionali. Solitamente le reti di osservazione e monitoraggio montane non sempre seguono procedure di misurazione standard e spesso non sono abbastanza dense per rappresentare cambiamenti di piccola scala, o semplicemente per il contesto ostile, sono più soggette a mal funzionamenti. Gli studi esistenti sui modelli climatici di aree montuose non sono generalistici ma molto specifici al luogo su cui sono calibrati, questo rende difficile fornire una valutazione uniforme a livello globale.

Temperatura dell'aria superficiale

Dagli studi delle osservazioni della temperatura dell'aria superficiale nelle Alpi europee, nelle Montagne Rocciose del Nord America e nell'Alta Montagna Asiatica è chiaro che negli ultimi decenni si è verificato un incremento medio di $0,3^{\circ}\text{C}$ per decennio, con un intervallo probabile di $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, superando quindi il tasso di riscaldamento globale di $0,2 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ per decennio (IPCC, 2018).

Inoltre si è notato che i tassi di riscaldamento locale dipendono dalla stagione. Nelle Alpi europee è maggiore in estate e primavera, mentre sull'altopiano tibetano è più pronunciato in inverno. Studi che confrontano osservazioni acquisite a quote inferiori evidenziano che il riscaldamento è generalmente amplificato sopra i 500 m s.l.m. (Wang, et al., 2016; Qixiang et al., 2018).

In aggiunta è evidente che il riscaldamento superficiale sia diverso tra le fasce altimetriche e al tipo di indice di temperatura: media giornaliera, minima e massima possono mostrare contrastanti variazioni a seconda della regione, stagione ed elevazione.

Gli studi di attribuzione dei cambiamenti della temperatura dell'aria superficiale, specifici alle regioni montane, sono rari. Bonfils et al. (2008) e Dileepkumar et al. (2018) hanno dimostrato che le emissioni antropiche di gas serra sono il fattore dominante nell'aumento recente della temperatura, parzialmente compensato da altri fattori antropogenici. Questi risultati sono coerenti con le conclusioni del Quinto Rapporto di Valutazione (IPCC AR5, 2014) sugli effetti antropici (Bindoff, et al., 2013).

Precipitazioni e Neve

In confronto ai cambiamenti di temperatura, le variazioni delle precipitazioni sia solide che liquide sono meno quantificabili e spesso più eterogenei nel contesto montano (Hartmann e Andresky, 2013). I modelli regionali sono caratterizzati da una variabilità decennale (Mankin e Diffenbaugh,

2015) e influenzati dai cambiamenti della circolazione atmosferica su larga scala (Winski, et al., 2017). Nonostante non si osservino tendenze chiare, negli ultimi decenni è evidente che le precipitazioni annuali siano diminuite specialmente a basse altitudini. Gli eventi meteorologici estremi variano a seconda della stagione e della regione con la tendenza nelle Alpi europee ad incrementare sia in frequenza che in intensità (Rajczak e Schär, 2017). La neve è fonte di sostentamento dei ghiacciai, fornisce una copertura riflettente e nelle sue prime forme assume il ruolo di isolante termico per la massa glaciale, influenzando anche il regime termico del permafrost sottostante (IPCC - High Mountain Areas AR6, 2023).

Secondo l'IPCC, negli ultimi decenni il cambiamento climatico ha generato una forte riduzione della copertura nevosa a bassa quota, dei ghiacciai e del permafrost.

La permanenza della copertura nevosa è diminuita in quasi tutte le regioni, in media di 5 giorni per decennio, e sebbene sia soggetta ad una forte variabilità annuale, lo spessore ed estensione a basse quote sono fortemente calati. I bilanci di massa globali svolti sui ghiacciai nel periodo 2006-2015 hanno rivelato abbassamenti di $-490 \pm 100 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ in tutte le regioni montane (escludendo l'Artico canadese e russo, Svalbard, Groenlandia e Antartide), e gli studi regionali sito-specifici svolti nelle Ande meridionali, nel Caucaso e nelle Alpi/Pirenei europei hanno dato risultati più negativi (inferiori a $-850 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) e con maggiori oscillazioni. Il 27-29% dell'area globale del permafrost è situato in aree di alta montagna (tra 3.6 e 5.2 km^2) e missioni di misura limitate e disomogenee svolte in 28 località sparse tra Alpi europee, Scandinavia, Canada e Asia nell'ultimo decennio hanno mostrato un aumento della temperatura in media di $0.19 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,05^\circ\text{C}$ con una riduzione dello spessore e degradazione del ghiaccio nel terreno. (IPCC AR6, 2023)

La riduzione della copertura nevosa ha modificato i cicli vita di alcune specie vegetali e animali dipendenti dalla neve, compresi i processi di foraggiamento e predazione tra mammiferi. Alcune specie adattate al freddo ed endemiche, sia terrestri che d'acqua dolce sono diminuite. (IPCC AR6, 2023)

Il contenuto di umidità atmosferica e aerosol

Il contenuto di umidità atmosferica, che secondo l'equazione di Clausius–Clapeyron è proporzionale alle temperature delle masse d'aria, influisce fortemente sui flussi di calore latente (Armstrong e Brun, 2008) e indirettamente sulle tempistiche e velocità di ablazione del ghiacciaio e fusione della neve.

In aggiunta l'aerosol presente nelle masse d'aria, una volta depositatosi sul corpo glaciale, influisce fortemente sull'albedo della superficie, aumentando l'accumulo di energia solare e così i

processi di ablazione e fusione (Kaspari, et al., 2014; Di Mauro, et al., 2015). Per lo stesso motivo, anche la copertura dovuta alla presenza di nuvole gioca un ruolo fondamentale nello schermare una parte dell'irraggiamento solare.

Vento

Il vento e la sua componente direzionale governa i processi di deposito delle precipitazioni e condiziona i processi ablativi con i flussi turbolenti che lo caratterizzano.

1.7. Conseguenze del cambiamento climatico in montagna e sui ghiacciai alpini

L'ambiente di alta montagna e in particolare i ghiacciai sono tra gli elementi più sensibili ed a rischio per la continua evoluzione del cambiamento climatico, che negli ultimi anni ha causato non solo un impatto e una crisi ambientale diffusa, ma anche conseguenze sociali ed economiche per le popolazioni che vivono questi luoghi (Martin Beniston, 2006). Sebbene solo il 26 % della popolazione mondiale risiede nelle montagne o in aree pedemontane (Meybeck, et al., 2001), le risorse provenienti dalle montagne forniscono sostentamento a metà della popolazione globale. Basti pensare che il 40% della popolazione mondiale vive nei bacini idrografici che prendono origine da aree montane e le cui risorse sono strettamente correlate (Martin Beniston, 2006).

L'aumento delle temperature lungo l'arco Alpino ha comportato forti alterazioni nel “**ciclo dell'acqua**” e nei bilanci idrologici che ne conseguono, modificando, in alcuni casi radicalmente, gli approvvigionamenti idrici ed energetici, gli equilibri già precari degli ecosistemi ed i processi di ricarica ed alimentazione degli acquiferi di pianura, che in alcuni casi, sono vicini alla depauperamento dovuto alla continua diminuzione e scarsa conservazione delle precipitazioni solide in quota (Martin Beniston, 2006). Anche le tempistiche e stagionalità del deflusso idrico verso valle, le portate delle sorgenti, i rendimenti agricoli ed idroelettrici stanno variando, anticipando i picchi primaverili e riducendo gli apporti estivi. Le diminuzioni maggiori sono osservate soprattutto nelle regioni caratterizzate da ghiacciai di piccole dimensioni come nel contesto delle Alpi europee.

Il “**rischio**” correlato ai fenomeni naturali legati al declino di ghiaccio, neve e permafrost è fortemente aumentato. Magnitudo, frequenza ed esposizione sono in crescita. L'evoluzione attuale dei ghiacci, del permafrost e della copertura nevosa hanno ridotto la stabilità dei pendii montani e hanno incrementato le valanghe di neve umida. L'aumento della popolazione ed infrastrutture esposte è dovuta alla crescita del turismo e allo sviluppo socioeconomico di queste aree.

Da un punto di vista socioeconomico, le attività turistiche e ricreative invernali come lo sci, il turismo glaciale e l'alpinismo sono state influenzate negativamente. Si è riscontrata una diminuzione della sicurezza nelle vie alpinistiche e dei sentieri d'alta montagna, una diminuzione delle economie legate ai comprensori sciistici di bassa quota e un impatto sugli aspetti estetici e culturali dei paesaggi montani, molti facenti parte del patrimonio dell'UNESCO, riducendo così il benessere delle persone.

I climi montani sono fortemente vincolati da quattro fattori principali (Barry, 1994):

- ***Continentalità***

Per continentalità ci si riferisce alla vicinanza dell'area all'oceano, che essendo meno soggetto a variazioni di temperatura rispetto la terra ferma riduce fortemente le escursioni termiche diurne e annuali anche delle aree circostanti. Inoltre gli Oceani, come il Mar Mediterraneo sono fonte di umidità per le masse d'aria in movimento verso terra, producendo maggiori precipitazioni in suddette aree (Martin Beniston, 2006).

- ***Latitudine***

La latitudine determina l'angolo di incidenza della radiazione solare e il moto apparente del sole rispetto ad un punto di osservazione, determinando le ore di irraggiamento giornaliero. All'equatore le ore di luce sono quasi 12 al giorno per tutto l'anno, alle medie latitudini (Alpi Europee) durante l'estate ci sono fino a 15-16 ore di luce, diminuendo d'inverno anche a 9 ore, alle latitudini più elevate (poli) le differenze aumentano fortemente, in estate ci sono giorni di sole continuo, al contrario dell'inverno caratterizzato anche da giorni senza sole (Martin Beniston, 2006).

- ***Altitudine***

L'altitudine è la caratteristica più distintiva dei climi montani. Densità atmosferica, pressione, e temperatura sono soggette ad un gradiente negativo nello strato troposferico. Le montagne sono fonti di calore per il forte irraggiamento a cui sono sottoposte e le temperature diurne sono più alte rispetto alle omologhe altitudini in atmosfera (Flohn, 1968). Inoltre la minore capacità termica dell'atmosfera in quota causa una diminuzione dell'escursione termica diurna ed annuale e la quota influenza fortemente la distribuzione della vegetazione e degli ecosistemi. (Ozenda, 1985; Quezel & Barbero, 1990; Klötzli, 1991, 1994; Rameau, et al., 1993).

- ***Topografia***

Per quanto i contesti montani d'alta quota possano differire da regione a regione, un aspetto ricorrente è la complessità della loro topografia, che induce forti gradienti di quota e ingenti variazioni dei parametri climatici di temperatura e precipitazione in distanze molto brevi (Becker & Bugmann, 1997). Ciò li distingue fortemente dalle aree continentali sotto il profilo climatico, idrologico e vegetativo (Whiteman, 2000), rendendoli un **hotspot** senza eguali nel panorama europeo. La topografia sito-specifica governa fortemente la determinazione dei climi locali, in particolare perché elemento rappresentativo dell'inclinazione, orientamento ed esposizione delle superfici agli agenti climatici e all'irraggiamento solare. Versanti rivolti a sud sono più soggetti

all'irraggiamento solare che influisce sia sulla conservazione delle precipitazioni solide che all'intensificazione della fusione dei ghiacciai e degradazione del permafrost (Martin Beniston, 2006).

Data la loro forte vulnerabilità, le montagne e i ghiacciai rappresentano un luogo di interesse per valutazione delle variazioni di parametri fisici, chimici e biologici dovute alle conseguenze del cambiamento climatico, rivelandosi ideali per la rilevazione precoce e lo studio delle possibili conseguenze delle azioni antropiche e dei suoi impatti sui sistemi idrologici, ecologici e sociali (Beniston, 2003). Si tratta di elementi con geometrie e morfologia fortemente variabili, che se confrontati con altre entità del paesaggio montano, i loro cambiamenti sono ben avvertibili anche nell'arco di una generazione umana. (Carton, 2012)

2. GHIACCIAI

2.1. Introduzione

I **ghiacciai** sono l'elemento criosferico più significativo per le comunità montane alpine italiane ed europee, e come detto in precedenza, sono fonte insostituibile di informazioni sul cambiamento climatico. I paesaggi che offrono rappresentano forse l'elemento più caratteristico e riconosciuto dell'ambiente alpino, e sono un vero e proprio simbolo dell'alta montagna.

In una visione globale i ghiacciai sono all'incirca 170.000, escludendo le aree dell'Antartide, Groenlandia, Artico canadese e russo, e Svalbard, e coprono 250.000 Km² della crosta terrestre.

Secondo il database del World Glacier Inventory (<http://nsidc.org>), sul versante italiano delle Alpi ci sono circa 1500 corpi glaciali di varie dimensioni (solo 130 di questi sono più grandi di 1 km²) e che coprono un'area di circa 800 km².

Grazie all'evoluzione delle tecniche di osservazione satellitari e in situ si può affermare che area, lunghezza e massa dei ghiacciai mostrano negli ultimi decenni una **tendenza di ritiro globale** (figura 16 e 17) (Zemp, et al., 2015), sebbene con una variabilità annuale, interannuale e regionale (Medwedeff e Roe, 2017).

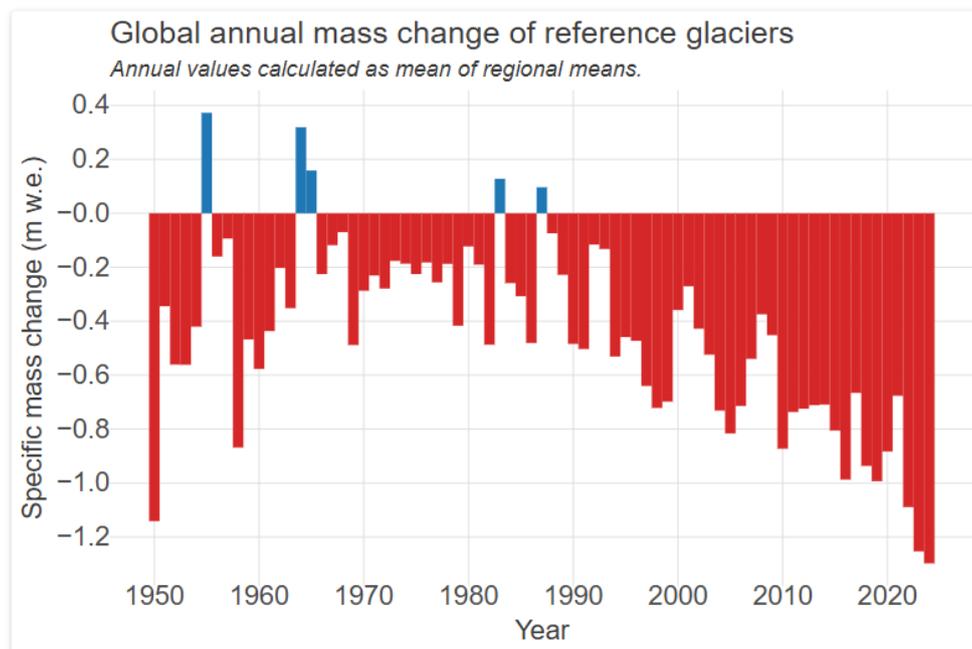


Figura 16: Variazioni di massa annuali dei ghiacciai monitorati da oltre 30 anni. M w.e. corrisponde a 1 ton/m² (WGMS)

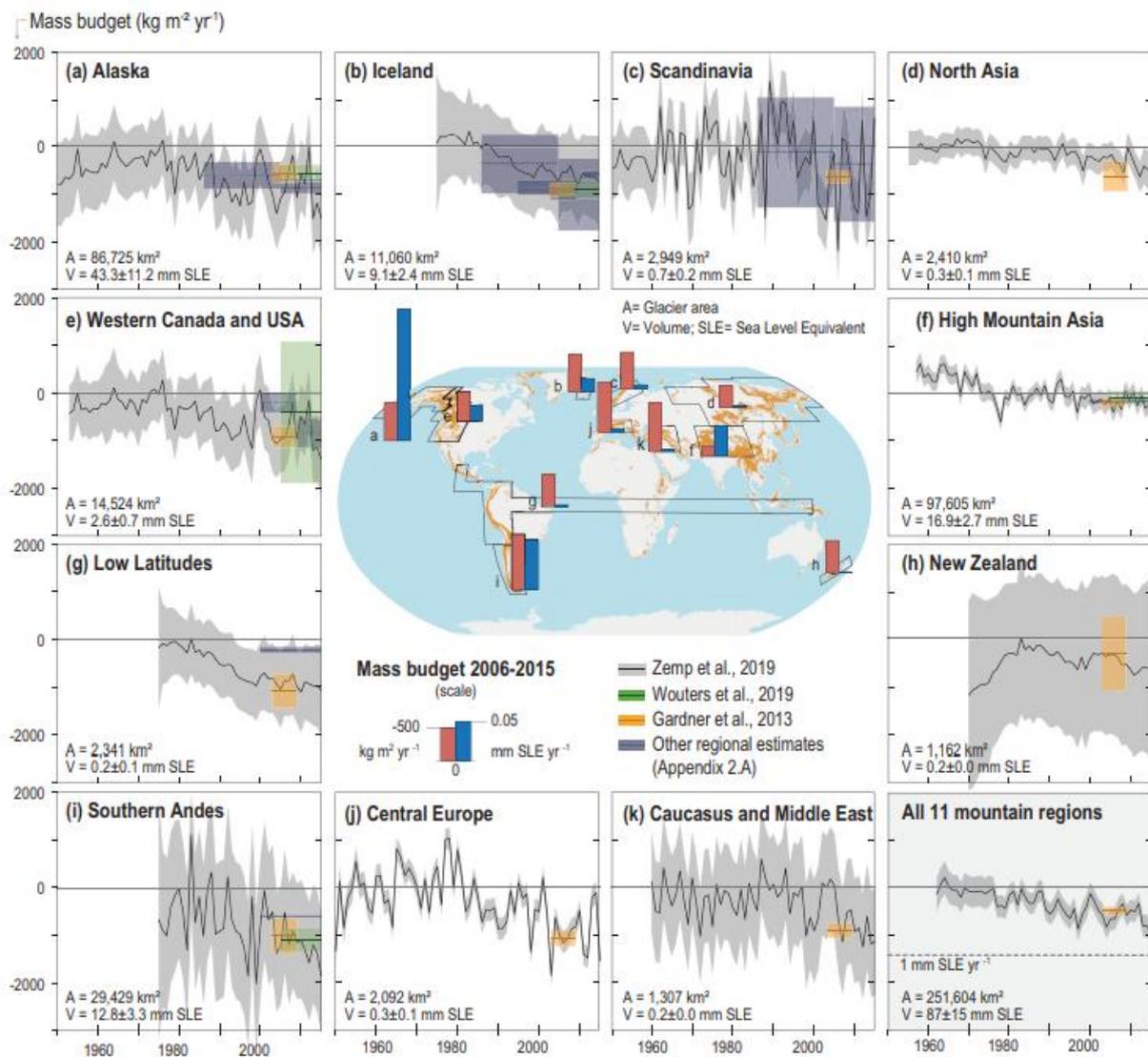


Figura 17: Le serie temporali regionali del cambiamento di massa annuale si basano su bilanci glaciologici e geodetici (Zemp et al., 2019). Sono sovrapposte medie pluriennali di Wouters et al. (2019) basate sul Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), calcolate solo per le regioni con un'area glaciale >3.000 km². Le stime di Gardner et al. (2013) sono state utilizzate nel 5° Rapporto di Valutazione dell'IPCC (AR5). Le barre rosse e blu sulla mappa si riferiscono ai bilanci regionali mediati nel periodo 2006–2015, espressi in unità di kg m⁻² yr⁻¹ e mm di equivalente del livello del mare (SLE) yr⁻¹, e sono derivati dalle stime del bilancio di massa disponibili per ciascuna regione.

È molto probabile che il **riscaldamento atmosferico** dovuto ai GHG emessi dall'uomo ne sia il principale responsabile (Marzeion, et al., 2014; Vuille, et al., 2018). In aggiunta altri fattori come variabili meteorologiche e la dinamica interna propria dei ghiacciai, hanno modificato la risposta delle formazioni glaciali all'aumento delle temperature. Un esempio è proprio il contesto europeo alpino, dove la diminuzione dei volumi è stata intensificata da una maggiore umidità dell'aria, con un conseguente aumento dell'irraggiamento a onda lunga (Thibert, et al., 2018).

Secondo le proiezioni, entro il 2100 rimarrà solo tra il 4% e il 13% della superficie glaciale originaria (Rasul, et al., 2020). Negli ultimi decenni, la linea delle nevi si è progressivamente alzata

e i giorni di copertura nevosa continuano a diminuire, aumentando velocemente l'area di ablazione che li caratterizzava (Vaughan, et al., 2013).

I ghiacciai non solo l'unico elemento del paesaggio alpino soggetto ad un bilancio negativo, anche il permafrost è in continuo cambiamento, con conseguenze multiple per gli ecosistemi montani vulnerabili e le popolazioni che li abitano.

Inoltre, è importante non dimenticare l'importanza socioeconomica delle aree montuose, in particolare in relazione al turismo. Le Alpi europee e molte comunità autoctone sono sorrette dall'industria del turismo invernale e dello sci, che dipende principalmente dalle condizioni atmosferiche e dalla neve. Sebbene negli ultimi anni le stazioni sciistiche stiano cercando di promuovere il turismo non strettamente legato allo sci su pista, la maggior parte dei profitti è originato dalla stagione invernale e dalle attività correlate. Intere comunità montane dipendono dal turismo invernale, specialmente nelle regioni alpine. Scenari di aumento di 2°C potrebbero portare a perdite economiche significative con conseguenti aumenti dei costi e seri rischi finanziari, e non da meno, una perdita di valori culturali e del benessere umano in tutta la regione.

Importanti processi di adattamento, e dove è possibile, di mitigazione sono l'unica opzione per ridurre i rischi causati dall'aumento delle temperature. Trasformazioni fortemente radicate sono in evoluzione tra le comunità, come la modifica della produzione agricola e la gestione delle risorse idriche, ma queste potrebbero non essere sufficienti nel lungo periodo.

Il monitoraggio dei ghiacciai è uno dei primi passi per mitigare e adattarsi a questi nuovi equilibri, per proteggere le popolazioni e la biodiversità in queste aree vulnerabili.

2.2. Terminologia glaciologica e tipologie di ghiacciai

Per la comprensione delle variabilità morfologiche caratterizzanti le masse glaciali è fondamentale chiarire il significato di alcuni termini e classificazioni:

“Lingua glaciale”: è la parte del ghiacciaio che occupa il fondo della valle e che comprende per lo più la zona di ablazione, ed è solitamente presente nei ghiacciai vallivi di prim'ordine. (Desio, 1967)

“Fronte glaciale”: Parte del perimetro del ghiacciaio, lo confina a valle nelle quote più basse. (Desio, 1967)

“Colata”: è un termine più generalistico rispetto alla lingua glaciale, e può essere usato per la parte inferiore del ghiacciaio specialmente nel caso di forme non riconducibili alla lingua umana. Viene anche utilizzata per le masse di ghiaccio laterali al ghiacciaio in movimento e che defluiscono da bacini di raccolta verso la lingua. (Desio, 1967)

“Lobi”: sono prominenze più brevi del ghiaccio. Sostituiscono le lingue di piccole dimensioni tipiche dei ghiacciai di secondo ordine. (Desio, 1967)

“Crepacci”: Sono fratture nel ghiaccio che possono arrivare anche a notevoli dimensioni. Nella maggioranza dei casi si manifestano parallelamente al fronte glaciale, quindi perpendicolari all’asse vallivo (“crepacci trasversali”), ma nel caso di forti restringimenti dovuti alla morfologia del territorio tendono a svilupparsi anche nella direzione di massima pendenza (“crepacci longitudinali”) .



Figura 18: Crepacci e seracchi

“Seracchi”: Formazioni a blocchi che fuoriescono nell’allargamento dei crepacci.

“Circo glaciale”: Un circo glaciale è una profonda nicchia di forma semicircolare caratterizzata da fianchi ripidi, circondata da creste, e nel caso non si sia completato il processo di deglaciazione racchiude un “ghiacciaio di circo” o la parte sommitale di un “ghiacciaio vallivo”. Esistono 3 elementi distintivi: una “testata o corona” con pareti rocciose subverticali delineate da sottili creste aguzze, una “soglia” modellata in roccia che lo delimita verso valle e che può sorreggere una morena, e un “pavimento concavo”, che generalmente delinea una contropendenza e si raccorda alla testata con una netta variazione di pendenza. Nel caso di “circhi inattivi o relitti”, generati da passate glaciazioni, coni e falde di detrito fasciano la base delle pareti della testata e occupano il

pavimento. Inoltre, nella zona depressa del circo relitto, possono ubicarsi “laghi di circo”, morene e depositi glaciali, o svilupparsi rock glaciers (Baroni, 2012)

“Linea d’equilibrio (ELA)”: è il luogo dei punti che separa il bacino di accumulo e il bacino di ablazione.

“Little Ice Age (Piccola Era Glaciale) o LIA”: Si tratta di un periodo di raffreddamento climatico avvenuto tra il XIV e il XIX secolo, durante il quale molti ghiacciai avanzarono in diverse regioni del mondo formando complessi morenici ben definiti.

“Bocca o porta del ghiacciaio”: È l’apertura generalmente presente sulla fronte del ghiacciaio, dalla quale fuoriesce un corso d’acqua.

“Trimeline”: È il limite dell’erosione glaciale, al di sopra si sviluppano i pinnacoli e al di sotto si trovano rocce levigate, striate ed in alcuni casi montonate. (Carton, 2012)

“Passo o sella”: È generata dallo smantellamento della cresta o testate per il congiungimento di due circhi opposti. Ciò comporta la creazione di una zona a dolce curvatura, nota come passo o sella, tipica di molti odierni passi alpini. (Carton, 2012)

“Spalle”: Sono aree di versante caratterizzate da rotture di pendenza e superfici debolmente inclinate, disposte parallelamente all’asse vallivo. (Carton, 2012)

“Truogoli”: sono forme dovute all’azione erosiva esercitata dai ghiacciai. Sono scolpite da corpi glaciali canalizzati che disegnano un reticolo di valli confluenti, alimentato da ampie aree di accumulo che coprono le porzioni più elevate dei rilievi montuosi. (Carton, 2012)

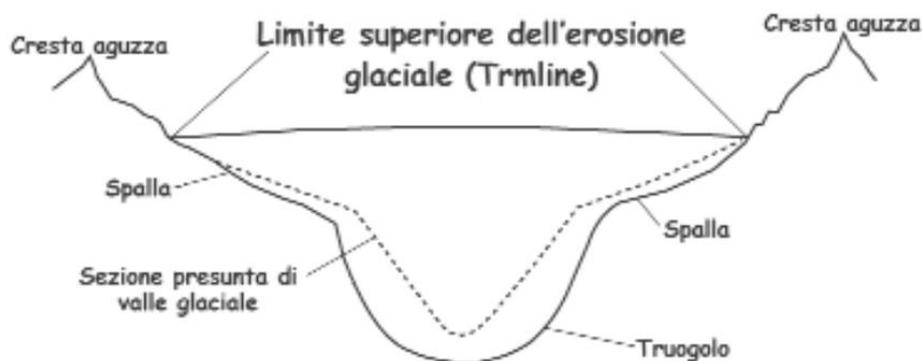


Figura 19: Nomenclatura degli apparati tipici di un ghiacciaio di circo. (MORFOLOGIA GLACIALE E PERIGLACIALE Responsabile d'area: Francesco Dramis - Università degli Studi di Roma Tre Coordinatore: Paolo Roberto Federici - Università degli Studi di Pisa)

“Deposito morenico / till”: Sono sedimenti trasportati e depositi dal ghiacciaio stesso, caratterizzati da una litologia fortemente eterogenea. Possono essere presenti percentuali variabili di argilla e limo, una prevalenza di sabbia da grossolana a molto grossolana ed un significativo contenuto di ciottoli e blocchi, con vari gradi di coesione e cementazione. La curva granulometrica varia sensibilmente a seconda dei meccanismi di sedimentazione e posizionamento (basale, laterale, sopraglaciale) dei detriti proveniente dal letto del ghiacciaio. L'argine morenico assume un ruolo di primaria importanza perché indica il perimetro delle aree in cui il ghiacciaio ha sostato abbastanza a lungo o in cui è arrivato in seguito ad un evento climatico, causa di una fase di allargamento seguita da una fase di ritiro. (Carton, 2012)

“Laghi glaciali”: I laghi glaciali sono i laghi che si formano dalla fusione del ghiacciaio. Si suddividono in: **“laghi periglaciali”** situati nelle aree circostanti al ghiacciaio o in contatto con esso; **“laghi proglaciali”** situati davanti al ghiacciaio; **“laghi epiglaciali”** situati sopra la superficie del ghiacciaio; **“laghi endoglaciali”** situati all'interno del ghiacciaio.

Le tipologie di ghiacciai descritte successivamente risalgono al vecchio Catasto del Comitato Glaciologico Italiano (C.G.I), alla classificazione di Ardito Desio, alla classificazione del Word Glacier Inventory (W.G.I) e alla classificazione del Servizio Glaciologico lombardo (S.G.I). Le diverse classificazioni tendono a sovrapporsi, e le più recenti risultano più articolate nel tentativo di rappresentare la varietà e la dinamicità dei corpi glaciali, influenzate anche dai cambiamenti climatici:

“Ghiacciai di primo ordine o alpini”: Sono ghiacciai di grandi dimensioni e che possono alimentare altre masse di ghiaccio più piccole. Questi ghiacciai sono solitamente localizzati in alta quota, presentano un unico grande bacino di accumulo e sono delimitati da una o più lingue glaciali di grosse dimensioni. (Smiraglia, 2012)

“Ghiacciai vallivi / himalaiani (C.G.I.) / composti (W.G.I.) / confluenti (S.G.L.) / articolati (C.G.I.)”: sono ghiacciai di forma complessa composti da più bacini collettori, solitamente delimitati da creste o vette e con dimensioni maggiori di 10 Km². Spesso presentano una completa copertura detritica della lingua (“debris covered glaciers”), dovuta alle forti pendenze delle pareti rocciose che la delimitano, ai numerosi ripidi apparati confluenti, e ai fenomeni termoclastici di cui è soggetta la superficie. Un esempio è il ghiacciaio dei Forni situato nel gruppo montuoso dell’Ortles-Cevedale. (Smiraglia, 2012)

“Ghiacciai di secondo ordine (De Saussure,1803) / vedrette / pirenaici”: La caratteristica principale è l’assenza di lingua glaciale. Sono ghiacciai di piccole dimensioni, spesso dipendenti dai ghiacciai di primo ordine, che una volta affermatasi la deglaciazione, permangono in condizioni topografiche favorevoli. Possono essere collocati in valli minori e a quote più basse, per cui, in quei casi, sono soggetti ad un minore accumulo di neve. Il loro comportamento di corpo fluido ad alta viscosità ne condiziona i processi di distribuzione spaziale e per le diverse topografie dei luoghi che le ospitano tendono ad assumere differenti forme. Per questo il loro nome deriva dalla morfologia del territorio in cui essi si trovano, dando così origine ai “ghiacciai di circo”, “di vallone o canalone”, “di versante o pendio”, “di altopiano o pianalto”, “di falda montuosa”, “di sella”, “di sommità”, “sospesi”. I ghiacciai minori sono solitamente soggetti ad una scarsa attività e offrono una risposta diretta alle sollecitazioni climatiche. Sono inoltre i più esposti ai processi di ritiro e ai bilanci di massa negativi che hanno contrassegnato il XX secolo. Per questo sono destinati ad estinguersi, se non ci saranno significativi inversioni nell’attuale tendenza alla deglaciazione nelle Alpi. (Federici, 2012)

“Ghiacciai di circo”: Sono posizionati in morfologie territoriali dette “circhi”, che classicamente sono di forma a conca e con una contropendenza verso valle, a causa del movimento rotazionale e dell’esarazione (erosione) della massa glaciale. Sono uno dei gruppi dominanti di ghiacciai, e nelle Alpi europee sono a centinaia. Per la forma tipica creano un microclima favorevole che li rende

eccellenti contenitori di ghiaccio e le configurazioni possono variare in dipendenza di fattori litologico strutturali. (Baroni, 2012)

“Ghiacciai di sommità”: Sono i ghiacciai posizionati sulla cima del complesso montuoso, un esempio è il ghiacciaio di Cima Tosa posizionato nelle dolomiti del Brenta. (Baroni, 2012)

“Ghiacciai di falda montuosa” : Sono legati alle falde delle pareti di rocciose che lo delimitano. (Baroni, 2012)

“Ghiacciai glacio-nevati”: Sono ghiacciai le cui dimensioni possono variare molto. Ve ne sono sia di piccole dimensioni che di dimensioni rilevanti. Un esempio è “il ghiacciaio della Marmolada” nelle Alpi dolomitiche, che non è un vero e proprio ghiacciaio ma più un insieme di piccole masse ghiacciate inerti e non organizzate. (Baroni, 2012)

“Ghiacciai rocciosi / Rock glacier”: sono ghiacciai costituiti da un nucleo in ghiaccio e da rocce e detriti. La loro forma è riconducibile a una lingua o a un lobo e, al contrario delle altre tipologie, presentano uno spostamento rapido fortemente evidente sulla morfologia del terreno che li ospita. (Guglielmin, 2012)

“Ghiacciai temperati”: Sono caratterizzati da una temperatura prossima al punto di fusione soprattutto alla base a contatto con il bedrock, dove è massima la pressione esercitata dal ghiaccio soprastante. Hanno elevata capacità erosiva, incrementata dalla circolazione d’acqua al contatto tra ghiaccio e roccia. (Baroni, 2012)

“Ghiacciaio morto”: Sono ghiacciai estinti, le cui depressioni sono parzialmente occupate da laghetti insediati nelle cavità della coltre detritica, e solitamente originati dalla fusione di zolle di ghiaccio presenti al di sotto del deposito glaciale. (Baroni, 2012)

“Calotte di ghiaccio (Ice caps)”: sono sottili strati di ghiaccio che coprono il terreno e l'ambiente sottostante.

“Campi di ghiaccio (Ice fields)”: si distinguono dalle calotte di ghiaccio per la dispersione del deflusso in direzioni differenti e per la loro discontinuità dovuta alla morfologia del territorio montano.

“Ghiacciai di marea (Tidewater glaciers)”: sono localizzati nell’oceano e possono dar luogo al fenomeno del distacco di iceberg (calving).

2.3. Dinamiche di formazione e bilancio dei ghiacciai

Per la genesi di un ghiacciaio è indispensabile che **la morfologia del territorio** sia caratterizzata da forme a conca, ripiani o valloni, che permettano la deposizione, conservazione e metamorfismo della neve. È fondamentale che le precipitazioni solide una volta depositatesi siano riparate dalle pareti rocciose circostanti dall'azione diretta della radiazione solare, difatti la maggior parte dei circhi glaciali sono localizzati con un'esposizione settentrionale e al di sopra del **“limite delle nevi perenni”**. Questo limite indica la quota dalla quale la neve caduta nella stagione precedente non si fonde durante le stagioni più calde permettendo così processi di accumulo e metamorfosi. Il processo di metamorfismo della neve (densità 0,05-0,40 g/cm³) è composto in più fasi: inizialmente il primo stadio è chiamato **“nevato o firn”** con una densità che varia tra i 0,40 g/cm³ fino a 0,83 g/cm³, successivamente si passa al **“ghiaccio di ghiacciaio o bubble ice”** con una densità tra 0,83 g/cm³ e 0,91 g/cm³ (Smiraglia, 2012). Una volta superata una determinata soglia di spessore, la massa glaciale comincia a fluire verso valle per fenomeni di deformazione interna e di scivolamento basale, iniziando così la sua azione di rimodellamento della superficie terrestre mediante forme di erosione, come i circhi glaciali, e forme di accumulo, come le morene.

L'evoluzione e la stessa sopravvivenza della massa glaciale sono fundamentalmente governate dalla quantità di neve precipitata nei periodi invernali e dai valori di temperatura estivi, che modellano l'estensione del **“bacino di accumulo”**, caratterizzato dalla presenza di nevato e da un aumento dei volumi, e del **“bacino di ablazione”**, caratterizzato dalla presenza di ghiaccio di ghiacciaio e da una riduzione dei volumi con ritiro del fronte (Smiraglia, 2012). Queste due aree caratteristiche sono separate dalla **“linea di equilibrio (ELA)”** o **“limite delle nevi”**, che nelle sue variazioni di quota rappresenta un vero e proprio bilancio tra le entrate per accumulo di neve per deposito diretto, trasporto eolico e valanghe e le uscite per fusione dei ghiacci e degradazione del permafrost.

Il ghiacciaio, nei suoi processi dinamici, ha la tendenza a bilanciare le entrate ed uscite attuando un trasferimento di materiale dal bacino di accumulo al bacino di ablazione. Quindi se per un determinato periodo l'accumulo è stato maggiore alla fusione, il ghiacciaio si espande verso valle in modo da aumentare la zona di ablazione, smaltendo l'eccesso di accumulo e abbassando di quota la linea di equilibrio; se al contrario è prevalsa l'ablazione il ghiacciaio si contrae per ridurre l'area soggetta a fusione alzando così la linea di equilibrio (Smiraglia, 2012).

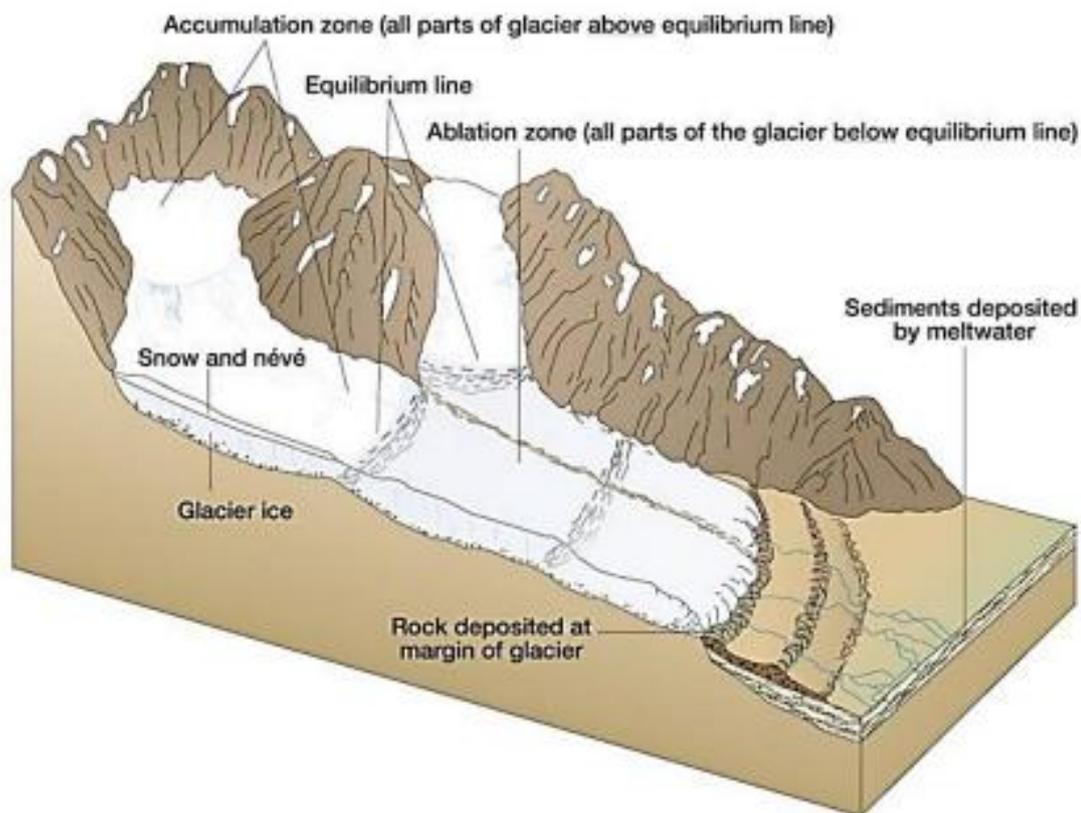


Figura 20: Dinamica delle formazioni glaciali (Christopherson, 2010)

Come detto in precedenza la linea di equilibrio è soggetta a una forte variabilità e con l'aumento delle temperature continua ad aumentare di quota (in figura 21 da ELA_1 a ELA_2). Questo provoca impatti differenti in base alla quota e alle dimensioni dei ghiacciai:

I ghiacciai di seconda categoria (small glaciers) tendono a scomparire completamente.

I ghiacciai montuosi (mountain glaciers) si riducono di spessore e sono soggetti alla frammentazione in unità minori

I ghiacciai alpini (valley glaciers) sono soggetti alla fusione delle lingue che li caratterizzano e sono soggetti ad una maggiore frammentazione in unità minori. Ciò comporta anche una trasformazione non solo morfologica ma anche tipologica dei ghiacciai.

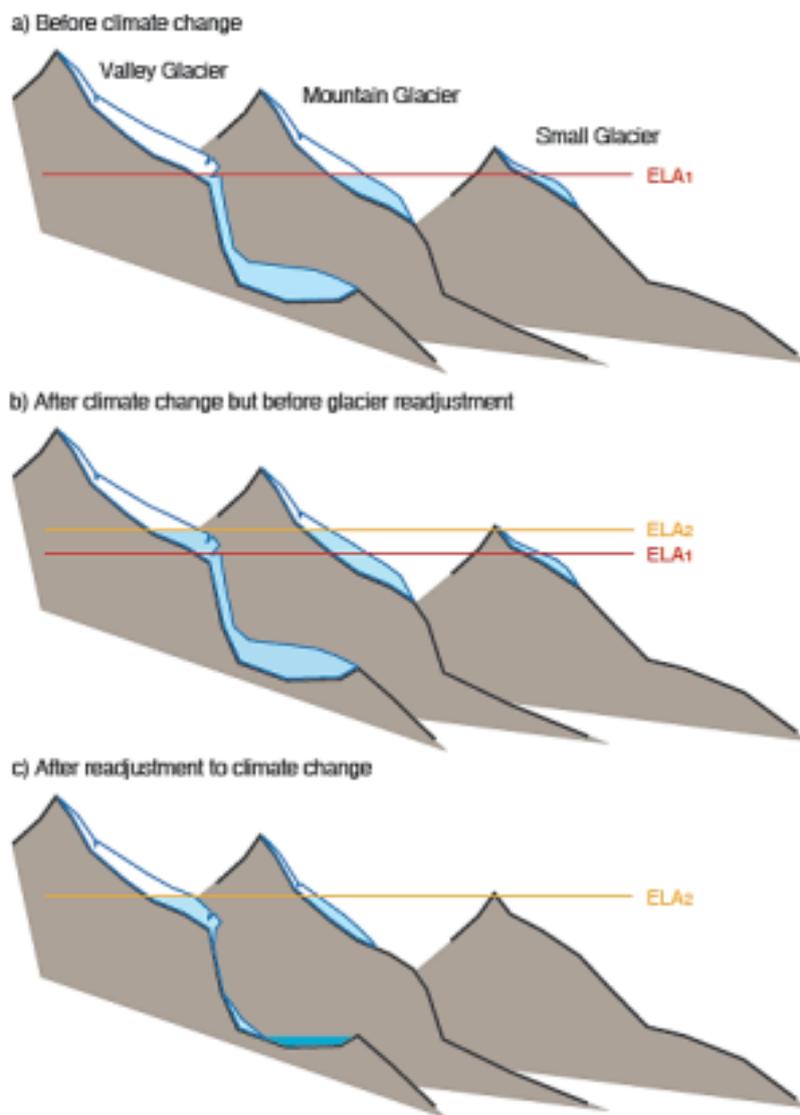


Figura 21: Schema di tre tipologie di ghiacciai localizzati a differenti quote e la corrispondente risposta all'innalzamento della linea di equilibrio (ELA)(IPCC AR5)

2.4. Importanza della copertura nevosa e dell'Albedo

La **copertura nevosa** è fondamentale per l'equilibrio dei ghiacciai. Non è solo la componente più importante per i processi di accumulo ma aiuta a regolare la temperatura proteggendo gli strati più profondi dalla fusione. I cambiamenti climatici stanno fortemente modificando i processi precipitativi nevosi, evolvendo forti fluttuazioni nel corso degli anni e dei decenni. “La linea delle nevi”, che indica la quota per cui la neve persiste tutto l'anno, si sta sempre più alzando e con lei la frequenza di precipitazioni liquide. Attualmente esistono modelli climatici che trattano anche l'evoluzione della copertura nevosa ed è già chiaro che l'aumento delle precipitazioni piovose nelle aree alpine, insieme alla tendenza delle temperature ad aumentare, ha portato a una riduzione del 25% della massa nevosa. (IPCC AR 6, 2023)

Inoltre il colore biancastro delle superfici influenza fortemente i valori di **albedo** dei territori caratterizzati da copertura nevosa e aree glaciali. Queste superfici permettono una maggiore riflessione dell'irraggiamento solare riducendone l'assorbimento.

Oltretutto è importante tener conto dell'aumento dell'irraggiamento all'aumentare della quota, rendendo il fenomeno con effetti più pronunciati rispetto alle basse altitudini.

Difatti una delle cause maggiori del ritiro dei ghiacciai è la variazione dei valori di albedo dovuti ai processi di deposito di polveri, particelle scure e **black carbon** (derivato dell'inquinamento) trasportati dal vento, che accelerano ulteriormente i processi di fusione riducendo i valori di riflettività e aumentando le temperature della copertura nevosa. La Rivoluzione Industriale sembra sia stata il fattore chiave che ha innescato nelle Alpi europee i processi di ritiro dei ghiacciai aumentando la produzione di particelle di fuliggine e black carbon in atmosfera. (Painter, et al., 2013)

2.5. Il movimento dei ghiacciai, processi erosivi e forme glaciale

Per i processi estremamente lunghi che caratterizzano la formazione dei ghiacciai, è facile pensare che essi siano masse statiche, ma in realtà sono sempre in movimento, creando ambienti caratteristici nel contesto montano e modellandone il paesaggio.

L'azione erosiva, detta anche “**esarazione**” dei ghiacciai vallivi, è fortemente riconoscibile nel contesto montano per il modellamento del profilo trasversale, che con l'allargamento dei fianchi ed un approfondimento del fondo, genera il famoso profilo ad «U» delle “**valli glaciali**”, scolpito direttamente nel substrato roccioso che li ospitava. Si noti inoltre che quasi tutti i fondovalle sono occupati da coni di deiezione e vere e proprie coltri alluvionali delimitate da versanti fortemente acclivi.



Figura 22: A sinistra la valle glaciale del rifugio Aosta: data la quota e il minor processo di sedimentazione conserva quasi completamente il tipico profilo ad U. (Scuola di alpinismo e scialpinismo Guido della Torre). A destra la vista risalente al 1866 della valle glaciale dello Yosemite vista dal punto panoramico “Union Point” (National park service).

L'erosione glaciale si evolve attraverso due meccanismi principali: “**l'abrasione**” che è un processo di levigatura e striatura del substrato roccioso per il detrito trasportato alla base del ghiacciaio, detto anche “**effetto lima**”; e “**l'escavazione**” che è l'insieme dei processi che determinano lo sradicamento e l'asportazione di blocchi di roccia ed il loro inglobamento nella massa glaciale. L'azione di erosione si sviluppa principalmente lungo l'asse vallivo, dove la velocità di movimento e lo spessore del ghiacciaio sono massimi, rendendola più efficace sul complesso geologico sottostante. L'abrasione glaciale modella la superficie topografica, levigando le rocce del substrato e dando origine ad un insieme di forme arrotondate; l'escavazione, invece, si manifesta attraverso un insieme di processi di disgregazione ed esportazione del substrato, aiutata dai processi di gelo-disgelo (questo processo è noto come effetto “pompa di calore” di Robin), con la completa disarticolazione dei detriti ed esportazione anche di blocchi di notevoli

dimensioni, detti anche “**massi erratici**” (figura 23), che nella loro movimentazione producono quello che è chiamato “**effetto aratro**”. (Baroni, 2012)

I fattori principali che condizionano la tipologia ed entità dell’erosione glaciale sono : **lo spessore** del ghiaccio che più è elevato, maggiore è la pressione esercitata sul bedrock; **la temperatura e la pressione dell’acqua** alla base del ghiacciaio; **la durezza dei detriti** trasportati alla base confrontata con quella delle rocce del substrato; **la capacità di asportazione** della roccia erosa e il suo grado di coesione; **il tempo**, tanto è maggiore la durata del processo quanto maggiore sarà l’efficacia del processo erosivo. (Baroni, 2012)



Figura 23: Esempio di masso erratico ("Massi erratici - Singolari testimonianze glaciali nel paesaggio" realizzato dai professori Luigi e Michele Motta del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Torino, Regione Piemonte)

La massima azione di esarazione avviene al disotto della linea di equilibrio, alla base del ghiacciaio. Presso la soglia di un circo, sul fondo e sui margini delle valli glaciali è facile trovare superfici arrotondate, levigate e striate, protuberanze e collinette allungate con il tipico profilo “**a dorso di balena (whaleback)**”. Nel caso l’abrasione maggiore sia situata sul lato meno inclinato verso monte, preceduto a valle da un tratto più ripido non abraso ma sottoposto ad escavazione, prendono il nome di “**rocce montonate**”, per l’analogia delle parrucche lisciate con grasso di montone (figura 24). Le rocce montonate sono orientate con la direzione di flusso del ghiacciaio che solitamente coincide con l’asse vallivo.

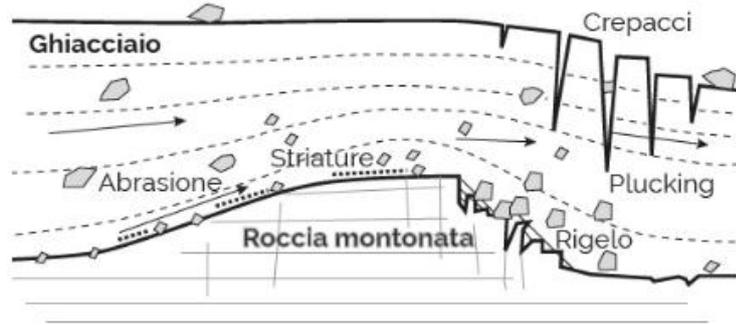


Figura 24: Processo di formazione di rocce montonate (Luigi Marson, Val Malenco Ecomuseo) ; esempio di roccia montonata (dinamica e fenomeni della morfologia glaciale, ScienzaNatura)

2.6. Pericoli legati ai ghiacciai

Con il termine “**nivazione**” si intende la combinazione dei fenomeni legati ai cicli gelo-disgelo a cui è sottoposta la placca di neve perimetrale al ghiacciaio, a contatto con il sub-strato roccioso. L’espansione volumetrica comporta un’alterazione meccanica del substrato e i processi di fusione, nel caso il bedrock abbia una litologia carbonatica, anche un’alterazione chimica della roccia. Il processo gelo- disgelo intacca fortemente anche il permafrost, che con il complesso geologico sottostante può comportare l’evoluzione di fenomeni gravitativi di tipo “**debris flows**”, di tipo “**scivolamento superficiale planare**”, e nel caso di interazione con la neve e ghiaccio: di “**geliflusso**” e “**valanghe di ghiaccio**”. Quest’ultime in particolare si possono evolvere anche in “**valanghe nubiformi**”, considerate tra le più pericolose date le velocità estremamente alte (fino ai 300 Km/h) e per il fenomeno chiamato “**soffio di valanga**” che può generare una sovrappressione fino a 0.8 ton/m²(Ciriani). Sono in costante aumento anche le valanghe primaverili formate da neve sciolta bagnata e dai processi di geliflusso, queste possono raggiungere velocità di circa 70 km/h.



Figura 25: Valanga di ghiaccio generata dal distacco di una porzione di ghiacciaio, trasformatasi successivamente in nubiforme. (Dimensione montagna).

La “**nicchia di distacco**” delle **valanghe di ghiaccio** prende origine nella parte alta del versante, è caratterizzata da una forma concava a semi-imbuto oppure a canalone più o meno stretto. Successivamente la massa si immette e scorre in un **corridoio di valanga** (avalanche track) di pendenza, lunghezza e larghezza variabili a seconda della morfologia, estensione e litologia del versante. Insieme all’aumento della massa nevosa questi elementi influenzano velocità e potenza

della valanga e quando l'accumulo raggiunge il fondovalle si forma un **cono di valanga** (avalanche cone) che aumenta evento dopo evento di volume. Solitamente per comprendere l'evoluzione dei vari fenomeni gravitativi si analizzano le diverse composizioni degli strati di cui è composto il conoide, che nello spostarsi verso valle ingloba i detriti e i vari materiali strappati dal substrato del canale. (Tellini, 2012)

I “**debris flows**” tendono ad evolversi in occasione di eventi meteorici intensi e possono originarsi in settori di versante in cui il permafrost di montagna è in fase di degradazione. Il processo di formazione della nicchia di distacco di valanga solitamente attiva contemporaneamente frane da crollo nelle rocce alterate o molto fratturate in cima al versante ed è direttamente connessa all'azione morfologica delle valanghe. (Tellini, 2012)

Un altro evento di cui sono soggette le aree sottostanti ai ghiacciai sono le “**alluvioni per rotte glaciali**” (outburst floods), dovute alla fuoriuscita improvvisa delle masse d'acqua insediate nei laghi epiglaciali e endoglaciali, e le “**alluvioni da laghi proglaciali e periglaciali**”. I laghi che si formano all'interno di sbarramenti costituiti da ghiaccio o da materiale sciolto poco coeso come i complessi morenici possono dare luogo a fenomeni di svuotamento improvviso, con conseguente evoluzione di “onde di piena” e di “debris flows”, che possono propagarsi fino a raggiungere infrastrutture o centri abitati. Negli anni recenti si è verificata in diversi settori dell'arco alpino la formazione di laghi glaciali con situazioni di rischio per il fondovalle. Esempi di noto conto si sono evoluti presso il monte Rocciamelone nel 2004, il Lago effimero del Belvedere nel 2002 e al lago di Grindewald nel 2005 (“laghi glaciali”, Arpa VDA e Montagna sicura). Per contrastare questa tipologia di eventi si consiglia l'attuazione di interventi artificiali per drenare gli accumuli idrici ed evitare fenomeni di “rotta glaciale”.

Inoltre, è importante considerare l'evoluzione del turismo di montagna, che stagionalmente porta ad una variazione delle aree e del numero di persone esposte a tali pericoli, creando una variabilità annuale nei valori di rischio. E sebbene negli ultimi anni i vari enti montani e del territorio stiano promuovendo molte attività estive che spesso hanno luogo in aree lontane dalle stazioni sciistiche e poco frequentate nel passato, in molti casi non si tiene conto del mancato aggiornamento della cartografia e pianificazione dei rischi di cui è soggetto, per tal motivo, il territorio.

3. GHIACCIAIO DEL RUTOR

3.1. I Ghiacciai della Valle d'Aosta

La Valle d'Aosta è una regione italiana a statuto speciale, situata nel nord-ovest della penisola italiana, a confine con la Francia. Il suo territorio è interamente inserito nel contesto alpino, ghiacciai e ambienti periglaciali dominano il paesaggio, e oltre il 30% del suo territorio si trova ad un'altitudine superiore ai 2.500 m sopra il livello del mare. La Valle d'Aosta ospita 192 ghiacciai, pari al 21,2 % del totale italiano, e si pone al secondo posto dopo la Lombardia. I ghiacciai sono distribuiti in sei gruppi montuosi: Gran Paradiso, Grande Sassièr, Rutor, Monte Bianco, Grand Combin, Cervino e Monte Rosa e coprono una superficie di 132,90 km² sui 3260 Km² della regione (figura 26). (Gruppo di Ricerca in Glaciologia e Cambiamenti Climatici, UniMi)

Gruppo montuoso <i>Mountain group</i>	Numero ghiacciai Nuovo Catasto <i>Number of glaciers New Inventory</i>	Numero ghiacciai Catasto CGI <i>Number of glaciers - CGI Inventory</i>	Area Nuovo Catasto (km ²) <i>Cumulative area - New Inventory (km²)</i>	Area Catasto CGI (km ²) <i>Cumulative area - CGI Inventory (km²)</i>	Variazione n° ghiacciai <i>Change in number of glaciers</i>	Variazione area (km ²) <i>Area change (km²)</i>	Variazione area (%) <i>Area change (%)</i>
GRAN PARADISO	40	48	23.36	34.32	-8	-10.46	-32%
GRANDE SASSIERE-RUTOR	68	59	28.49	42.44	9	-13.95	-33%
MONTE BIANCO	31	31	36.85	41.15	0	-4.30	-10%
GRAND COMBIN	17	18	3.21	7.84	-1	-4.63	-59%
CERVINO	24	33	15.88	26.62	-9	-10.74	-40%
MONTE ROSA	12	15	25.11	28.54	-3	-3.43	-12%
TOTAL	192	204	132.90	180.91	-12	-48.01	-27%

Figura 26: Distribuzione, area e variazioni dei ghiacciai valdostani suddivisi per gruppi montuosi.

La maggior parte dei ghiacciai della Valle d'Aosta sono ghiacciai di piccole e medie dimensioni, circa il 55% di essi è nelle classi di superficie di 2-5 km² e 5-10 km², tra i più soggetti al cambiamento climatico e ai processi di ritiro (figura 27 – prime quattro classi).

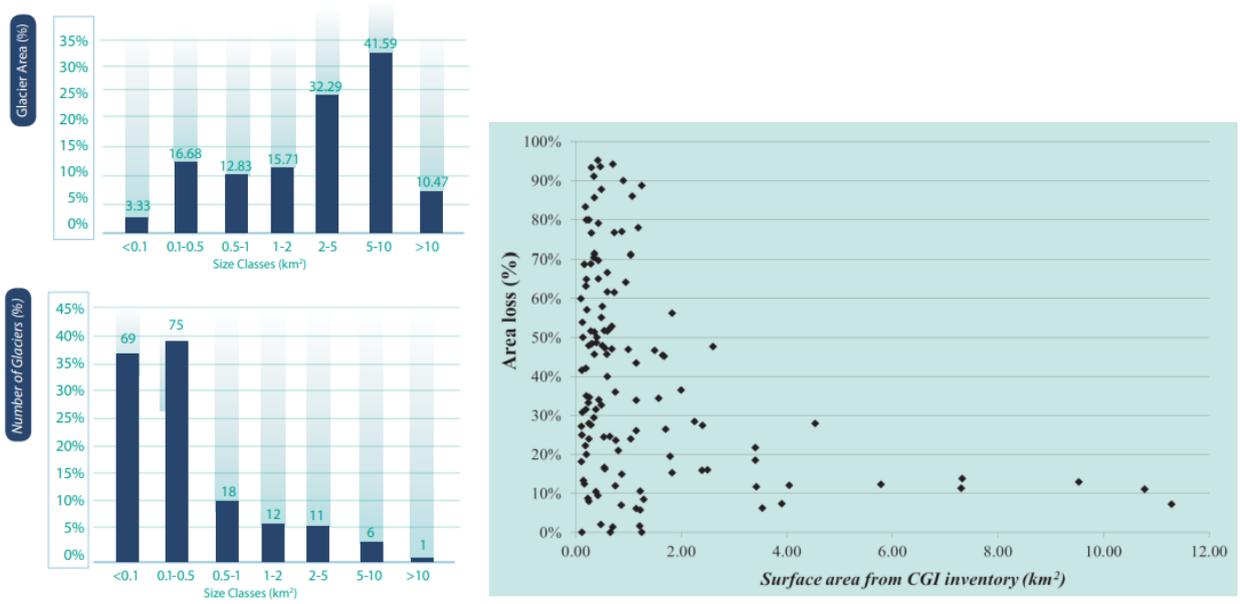


Figura 27: Figura sinistra: Distribuzione delle aree dei ghiacciai valdostani in funzione di 7 classi dimensionali (sopra) valori in % sul totale; i valori sopra le colonne indicano le aree di ciascuna classe in km². Distribuzione del numero dei ghiacciai valdostani in funzione di 7 classi dimensionali (sotto) valori in % sul totale; i valori sopra le colonne indicano il numero di ghiacciai di ciascuna classe.

Figura destra: Relazione fra superficie degli apparati glaciali nel catasto CGI (asse x) e riduzione areale percentuale (asse y). Le elaborazioni riguardano il solo campione confrontabile. Si noti che le maggiori riduzioni risiedono nelle prime quattro classi.

3.2. Monitoraggio dei Ghiacciai in Valle d'Aosta

Gli studi glaciologici in Italia presero continuità e consistenza a partire dagli ultimi quindici anni del XIX Secolo, grazie al fondamentale ruolo della Commissione per lo Studio dei Movimenti dei Ghiacciai poi diventata **Commissione Glaciologica Italiana**, fondata nel 1895 dal Club Alpino Italiano. Inizialmente gli articoli furono essenzialmente ospitati nei periodici di storiche società naturalistiche, geografiche, geologiche, di varie Accademie e nel bollettino e rivista mensile del Club Alpino Italiano.

Il lavoro di studio e rilievo in campo svolto con regolarità sin dal 1911, con solo poche e limitate interruzioni in alcuni anni di guerra, ha consentito di raccogliere una delle più lunghe serie di osservazioni delle variazioni frontali glaciali esistenti al mondo. Le campagne glaciologiche annuali hanno permesso di acquisire e confrontare negli anni un'enorme massa di dati relativi alla morfologia delle fronti, grazie a reti di misura delle distanze da punti di controllo a terra e una preziosissima documentazione fotografica.

Successivamente, dal 1914 l'attività inizia ad essere coordinata dal **Comitato Glaciologico Italiano** (CGI) con la pubblicazione del suo primo bollettino. Attualmente, circa 150 ghiacciai campione vengono controllati ogni anno da volontari e team specializzati dei vari enti territoriali. (CGI)

Durante il periodo tra 1850 e 2005, **il volume del ghiaccio nelle Alpi europee è diminuito drasticamente**. I ghiacciai hanno perso circa il 47,5% del loro volume dal 1850 al 1975, e la perdita annuale è aumentata negli anni successivi, con una diminuzione del 12,5% tra il 2000 e il 2005 (Haeberli, et al., 2021).

Nel **2019, la campagna di misurazione** gestite dal CGI hanno rivelato che 51 dei ghiacciai della Valle d'Aosta erano in ritiro (94% dei ghiacciai misurati), solo 3 ghiacciai erano in condizioni stazionarie e nessun ghiacciaio stava avanzando. La misurazione dei fronti ha mostrato in alcuni casi condizioni simili a quelle dell'anno precedente, ma nella maggior parte si sono trovate situazioni più drammatiche. Inoltre, c'è stato un aumento dei detriti e dei sedimenti sui ghiacciai, un chiaro segnale del loro ritiro.

La **campagna di misurazione del 2022** ha dato esiti molto simili: i risultati delle misure per lo più riferite al 2021 hanno mostrato 59 ghiacciai in ritiro (98% dei ghiacciai misurati), 1 ghiacciaio stazionario (2%) e nessun ghiacciaio in avanzata. (Chiarle, 2022)

La **campagna di misurazione del 2023** è ancora più drammatica delle precedenti, i risultati delle misure riferite al 2022 possono essere così sintetizzati: i ghiacciai in ritiro sono 52 (100% dei ghiacciai misurati), e non sono stati rilevati ghiacciai in condizioni stazionarie o in avanzamento. Inoltre in sette casi le rapide trasformazioni dei fronti glaciali hanno reso necessario il posizionamento di nuovi punti segnali, interrompendo la continuità delle serie di misura. (Chiarle, 2023)

Dati forniti dall'**ARPA Valle d'Aosta** mostrano che in 20 anni, dal 1999 al 2020, 41 ghiacciai sono scomparsi, passando da 216 a 184 ghiacciai, con una riduzione della superficie di 16 km² all'anno.

3.3. Ghiacciaio del Rutor

Il **ghiacciaio del Rutor** e il Massiccio del Rutor sono situati, nella Valle di La Thuile nelle Alpi Graie, all'interno della Regione autonoma della Valle d'Aosta, al confine italo francese. Con una superficie di circa 7 km², è il terzo ghiacciaio più grande della Valle d'Aosta, dopo i ghiacciai di Miage e Lys. È anche chiamato **'Ruator'** o **'Rhutor'** e il suo nome deriva dal francese-provenzale **'Ru'**, che significa piccolo fiume, e **'Tors'**, che significa arduo, a sottolineare un percorso caratterizzato da salti rocciosi, livelli e precipizi lungo il corso d'acqua che ne fuoriesce. Il ghiacciaio è lungo 4,68 km e si estende da 2540 m a 3486 m s.l.m.

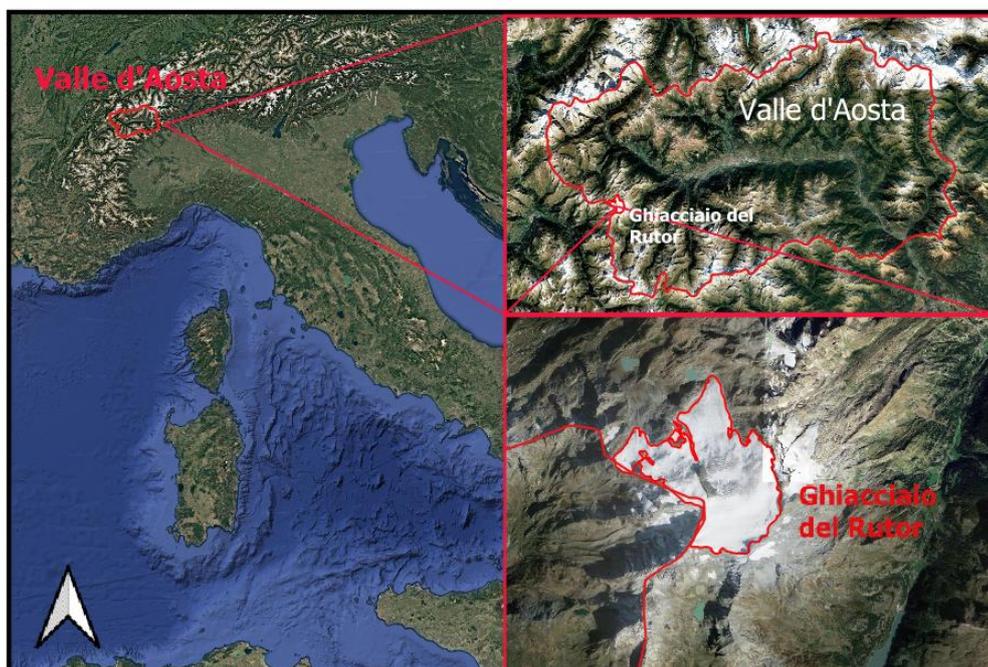


Figura 28: Ubicazione Regione autonoma della Valle d'Aosta e Ghiacciaio del Rutor.

Non è l'unica massa glaciale che caratterizza l'area montuosa, ma sono presenti sul perimetro ghiacciai minori di secondo ordine come: il glaier du Grand e il Glacier de l'invernet situati ad ovest oltre il confine francese, ad est si trovano il ghiacciaio del Flambeau, il ghiacciaio del Invergneures, il ghiacciaio del Tsassè Blance e il ghiacciaio del Chateau Blanc, a sud oltre la Testa del Rutor si trovano i ghiacciai Saint Grat Dessus e Moriond Dessus.

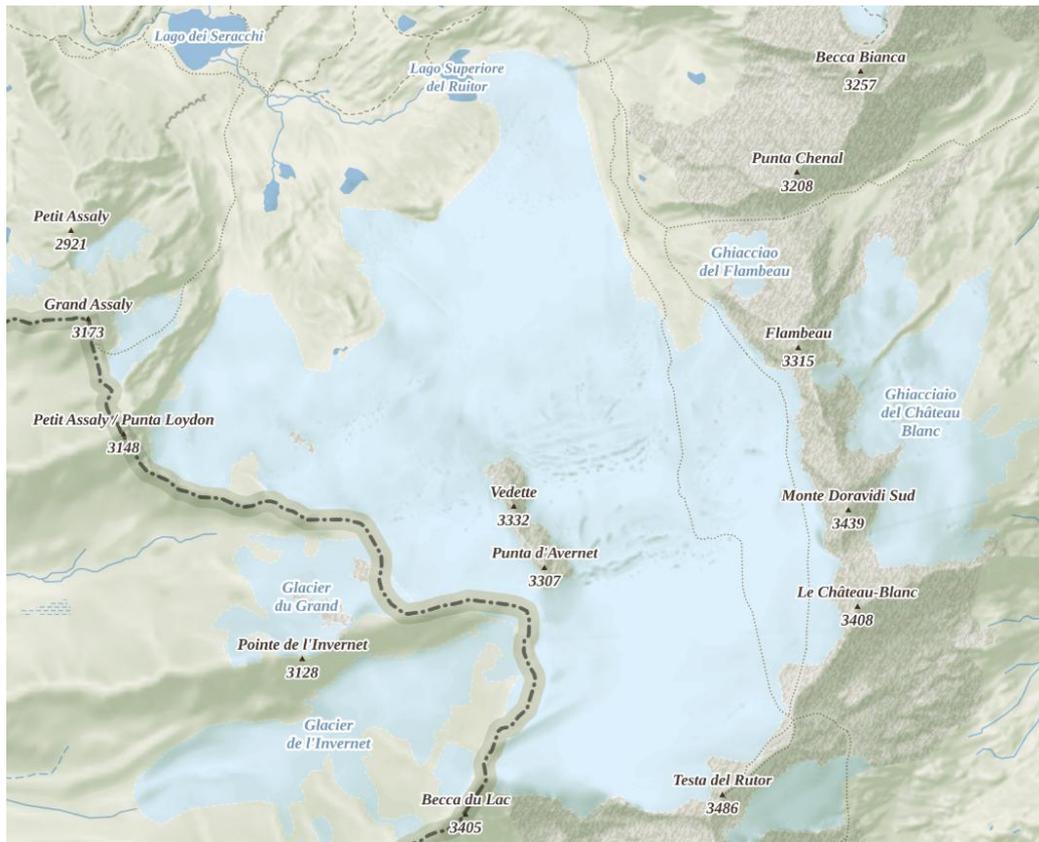


Figura 29 : Ghiacciaio del Rutor e toponomastica dell'area (mapy.cz)

3.4. Morfologia del ghiacciaio del Rutor

Il ghiacciaio si estende da nord a ovest con una forma abbastanza regolare e caratterizzata nella maggior parte da piccole pendenze, tranne nell'area centrale contraddistinta dai crepacci in continuo spostamento e da un aumento delle acclività. È quasi diviso in due parti dalle “Vedette du Rutor” e il fronte è composto da 2 lingue glaciali, di cui quella orientale presenta una bocca di ghiacciaio ben evidente, e un lobo centrale. Sono inoltre presenti una serie di laghi periglaciali: i cui principali sono il Lago superiore del Rutor, i Nuovi laghi, il Lago Marginale e il Lago dei Seracchi, insediati nel complesso morenico e bed-rock che ne segue il perimetro. Era presente nel passato anche il Lago Santa Margherita, del quale oggi rimangono solo tracce di una vasta depressione detta “torbiera” che si estende perpendicolare al ghiacciaio. La regione che lo ospita è famosa anche per le meravigliose cascate del torrente Rutor visibili lungo il sentiero che conduce al rifugio Deffeyes.



Figura 30: Vista tridimensionale del ghiacciaio e Toponomastica dell'area (mapy.cz)

3.5. Analisi dei dati di letteratura riguardo al monitoraggio dei processi di ablazione ed Eventi Storici

Durante la Piccola Età Glaciale, a cui corrispondo i dati LIA (1850), **il ghiacciaio del Rutor** aveva una vasta estensione di circa 12Km² (Villa, et al., 2007), arrivando fino a 2150 m s.l.m. in direzione valliva e raggiungendo il Lac du Glacier, sopra La Thuile, sulla piana conosciuta come Plan del la Lière, che in passato, era di dimensioni maggiori.

I primi dati di monitoraggio del ghiacciaio risalgono al 1820, e mostrano un inizio di ritiro del fronte e depauperamento del Lago Margherita. Dal termine della Piccola Età Glaciale al 2004, il ghiacciaio del Rutor ha subito una regressione frontale di circa 2 km, intervallata da due periodi “freddi” di avanzamento, e tra il LIA e il 1991 ha perso circa **480 milioni di metri cubi** di ghiaccio e il 34% della sua superficie (Corte, et al., 2023). Le analisi morfologiche e volumetriche hanno portato a dimostrare come negli ultimi decenni il ghiacciaio abbia perso grandi quantità di massa, senza però registrare un parallelo regresso frontale, mantenendo così pressoché costante la sua superficie e subendo un generale assottigliamento. La quota della Linea di Equilibrio si è spostata da 2775 m nella Piccola Età Glaciale a 2850 m nel 1991, con una variazione di 75 m.

Le proiezioni degli scenari climatici stimano che il ghiacciaio si ritirerà fino a 1,5 km entro il 2100 (Strigaro, et al., 2016). Il continuo ritiro modifica fortemente l'ambiente, la morfologia e il sistema idrologico dell'area e le dinamiche dell'ambiente proglaciale hanno creato diverse morene, laghi e trasporto di sedimenti (Vergnano, et al., 2023).

Nel 2018 è stata condotta una ricerca sulle variazioni climatiche, della vegetazione e dell'estensione del ghiacciaio dal tardo Olocene agli anni recenti, studiandone la stratigrafia. È stato scoperto che durante il medio Olocene, il ghiacciaio ha subito una fase di contrazione susseguita da un'espansione per la diminuzione delle temperature di 1.8°C (Badino, Ravazzi, et al., 2018).

Numerose “**alluvioni da laghi periglaciali**” si sono evolute dai suoi processi di ritiro. Le più distruttive e problematiche, conosciute da dati di letteratura, si sono verificate tra il 1594 e il 1598, alcune durante il XVII secolo e due eventi nel 1751 e 1752. Si pensa che nel passato ci fosse una frequenza annuale di eventi di questa tipologia e alcuni di questi si sono verificati contemporaneamente ad inondazioni a scala regionale, come quella del 1640 che causò l'inondazione della città d'Aosta (Bonetto, 2015). Le alluvioni erano causate dalla lingua glaciale, che impediva all'acqua di defluire nel Lago Santa Margherita, e quando la pressione dell'acqua aumentava, la parete rocciosa crollava causando l'inondazione.

Attualmente il ghiacciaio del Rutor è monitorato da ARPA Valle d'Aosta in collaborazione con il CC-Glacier Lab del Politecnico di Torino.

3.6. Tecniche di monitoraggio dei ghiacciai

Il monitoraggio dei ghiacciai e in generale delle matrici ambientali collocate in alta quota implica, nella maggior parte dei casi, notevoli difficoltà, costi elevati e personale altamente specializzato. Spesso per raggiungere tali luoghi e trasportare le strumentazioni necessarie si devono affrontare sentieri e vie d'accesso impervie o utilizzare mezzi di trasporto come l'elicottero, da cui consegue un forte aumento delle spese.

Tradizionalmente, le osservazioni sulle variazioni frontali dei ghiacciai Alpini Italiani sono condotte mediante “**reti di strain net**” che consistono in misurazioni di distanze con **tecniche topografiche tradizionali**, spesso integrate con **tecniche GNSS**, tra il fronte ed alcuni punti di controllo materializzati in zone geologicamente stabili (Villa, et al, 2007). Queste analisi forniscono dati puntuali che devono essere ampliate al resto del ghiacciaio. Dal 1913 il Comitato Glaciologico Italiano esegue questo tipo di analisi e pubblica i risultati annualmente nel suo bollettino.

Un altro metodo tradizionale è l'utilizzo di **paline da neve o sonde da valanga centimetriche** che permettono di misurare gli accumuli nel caso lo strato di neve depositata sia facile da penetrare. Un metodo simile sono i **carotaggi** che permettono uno studio più approfondito della stratigrafia. C'è comunque da considerare che questi metodi possono dare risultati di tipo puntuale, e necessitano un'implementazione di tecniche di **telerilevamento fotogrammetrico e LiDAR implementato con dati acquisiti da GPR**, che permettono uno studio delle deformazioni spazialmente distribuito.

In alcuni casi, per la misurazione del perimetro del fronte vengono utilizzati **ricevitori GNSS in modalità RTK**, che permettono l'acquisizione immediata di coordinate con precisione centimetrica e così il tracciamento del perimetro di lingue o lobi glaciali.

Un'altra tecnica di imaging ad alta risoluzione utilizzata per la misurazione dei volumi della massa glaciale è il “**GPR o Georadar**” (“Ground penetrating radar”) che attraverso lo studio della “permittività” (proprietà di risposta dei materiali alle onde elettromagnetiche) riesce a riconoscere fratture, accumuli e stratigrafia della neve, e se ben dimensionato anche il limite tra ghiaccio e bed rock. Anche questa tecnica però fornisce solo un dato puntuale e spesso, se non integrata con tecniche di misura GNSS, non georeferenziato.



Figura 31: Figura sinistra: Misura dell'accumulo nevoso tramite GPR- Ground Penetrating Radar effettuata dei tecnici del Politecnico di Torino – DIATI;

Figura destra: Misura dello spessore del manto nevoso con sonda da valanga.

Per questi motivi uno strumento prezioso e insostituibile per il monitoraggio di un ghiacciaio è il **telerilevamento o remote sensing** che permette l'acquisizione di dati spaziali e non puntuali, senza che ci sia un contatto diretto con il target o fenomeno da studiare. Ciò ha permesso di indagare in modo completo la variabilità morfologica del ghiacciaio e le sue dinamiche anche in aree di più difficile accesso e con risoluzioni che variano in base alla scala del rilievo.

I sensori installati sulle varie piattaforme, UAV “Unmanned Aerial Vehicle”, Aereo o Satellite, sono di due tipologie: i **sensori attivi** dotati di un emettitore e di un ricevitore (Sensori Radar e LIDAR), e i **sensori passivi** che si limitano a misurare l'energia riflessa ed emessa dal target (sensori ottici). I sensori passivi più utilizzati, indispensabili per l'elaborazione di prodotti fotogrammetrici, sono i “**sistemi passivi fotografici**”, che misurano le radiazioni della parte visibile dello spettro (bande RGB). Esistono anche sensori in grado di non limitarsi alla parte visibile (Radiometri o spettroradiometri) ed in grado di acquisire quella che è definita come “firma spettrale” del target. La “**firma spettrale**” o “risposta spettrale” sono le radiazioni che un materiale riflette ed emette in funzione della lunghezza d'onda, ciò permette di identificare caratteristiche del target e di svolgere processi di classificazione più accurati.

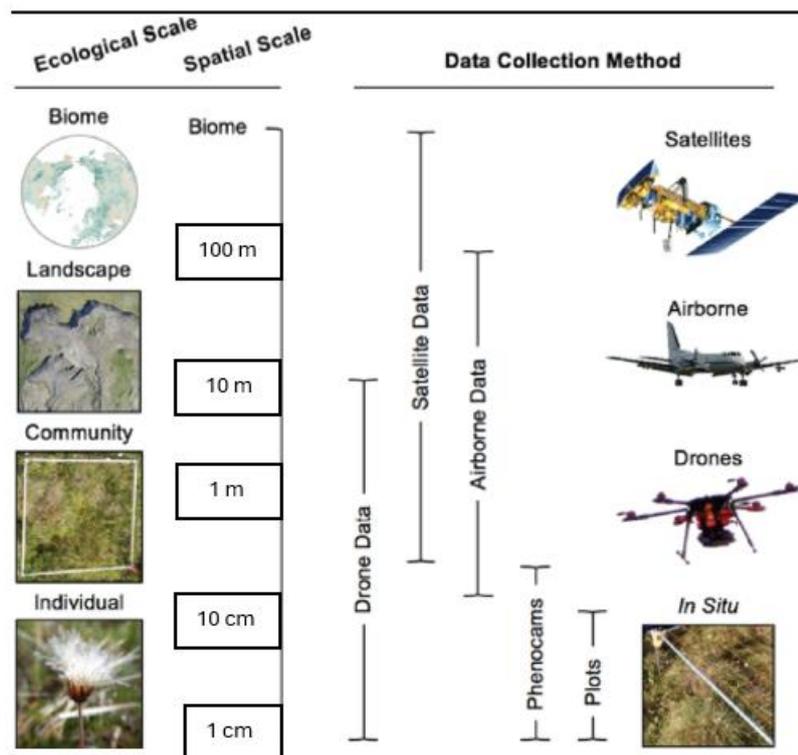


Figura 32: Risoluzioni spaziali delle tecniche di telerilevamento utilizzate per il monitoraggio, relative alla tipologia di sensore e piattaforma.

Dall'elaborazione di dati fotogrammetrici si riescono a generare i **DEMs** (Modelli digitali di elevazione) che attraverso l'utilizzo di software GIS (Sistemi Informativi Geografici) consentono una gestione più completa dei dati territoriali rispetto ai metodi tradizionali, permettendo così diversi tipi di elaborazioni con un rapido confronto dei risultati.

Il risultato finale del monitoraggio, perseguito dagli enti di monitoraggio come ARPA Valle d'Aosta, è il calcolo dei **bilanci di massa** mediante l'integrazione di diversi metodi di misura: prodotti fotogrammetrici, misurazioni del ritiro del fronte con reti strain net e misure GNSS, misurazioni dello spessore con georadar e paline nivometriche.

4. PRINCIPI DI FOTOGRAMMETRIA

La **fotogrammetria** è una tecnica di rilievo della geomatica che consente l'ottenimento di informazioni spaziali, posizione, forma e dimensioni di un oggetto. Si basa sull'acquisizione di almeno due fotogrammi da due punti differenti e sul riconoscimento dei “**tie point**”, cioè “punti di legame” presenti in entrambe le immagini. Solitamente per l'ottenimento di un buon risultato si consiglia una sovrapposizione minima longitudinale del 60 % e trasversale del 20% dei vari fotogrammi.

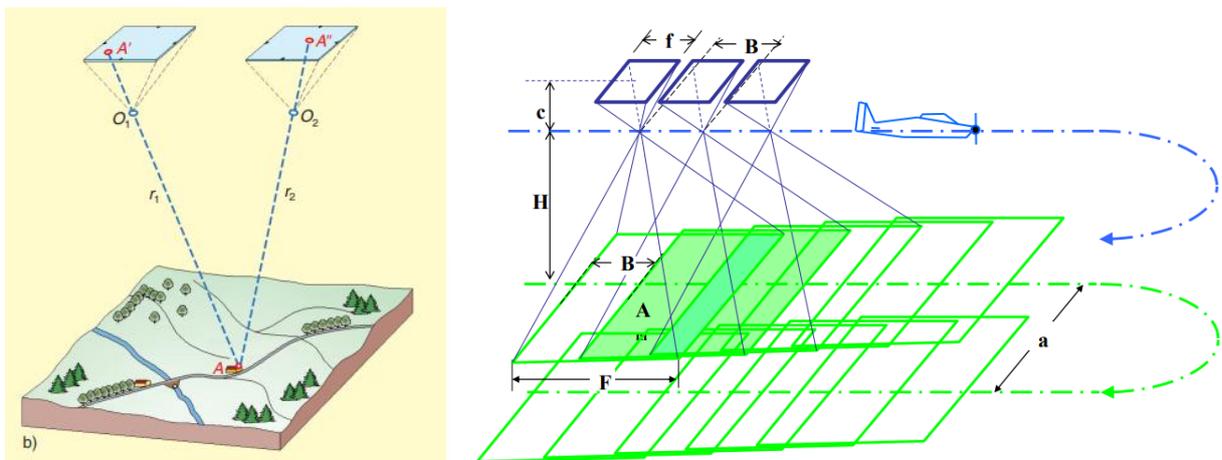


Figura 33: Sovrapposizione dei fotogrammi, tie points, esempio di piano di volo.

La scienza fotogrammetrica moderna permette la restituzione di **nuvole di punti dense e modelli 3D**, potendone estrapolare coordinate locali o globali, DEMs (Digital Elevation Models), DTMs (Digital Terrain Models), DSM (Digital Surface Models) ed Ortomosaici o Ortofoto. È fortemente utilizzata per il monitoraggio ambientale di deformazioni di versante e delle infrastrutture, nell'analisi di degrado dei materiali (per esempio il copriferro delle strutture in cemento armato), ed in applicazioni industriali e architetture.

Un **fotogramma** è una prospettiva centrale, in cui i segmenti che congiungono i punti dell'oggetto con i loro corrispondenti punti sul piano immagine si intersecano nel “**centro di presa**”.

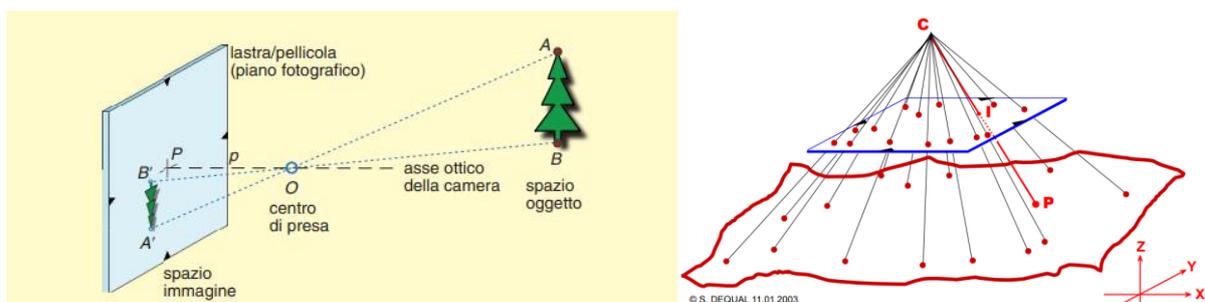


Figura 34: Piano immagine, piano oggetto, centro di presa, raggi omologhi, stella di direzioni.

Quindi grazie a questo a principio si possono scrivere le equazioni cardine della restituzione fotogrammetrica chiamate “**equazioni di collinearità**”, che in “**modalità di restituzione**” permettono di definire **le coordinate oggetto** in funzione:

- dei **parametri di orientamento interno**, coordinate del punto principale nel sistema fiduciale (ξ_0, η_0) e la distanza principale “ c ” detta anche distanza focale o distanza del centro di presa;
- dei **parametri di orientamento esterno**, coordinate del centro di presa (X_0, Y_0, Z_0) e angoli di orientamento della camera $(\kappa, \varphi, \omega)$ da cui derivano i valori dei coseni direttori $(r_{i,j})$ della matrice di rotazione R ;
- delle **coordinate immagine** (ξ, η)

Le equazioni di collinearità si scrivono nella seguente forma e sono risolte attraverso un processo ai minimi quadrati con 3 incognite e 4 equazioni, 2 per fotogramma.

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}$$

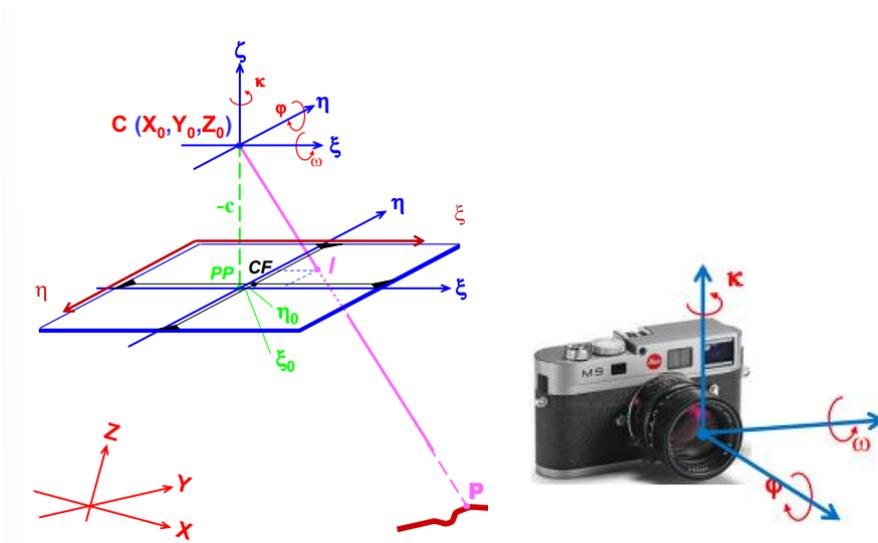


Figura 35: Parametri di orientamento interno, parametri di orientamento esterno, coordinate immagine e oggetto.

“Il rilievo di dettaglio” svolto con tecniche fotogrammetriche necessita di un’accurata pianificazione del “piano di volo” e delle geometrie della camera utilizzata. L’obbiettivo è avere una buona sovrapposizione dei fotogrammi, la sicurezza di includere totalmente l’area del fenomeno in analisi e di conservare un fattore di scala medio “n” omogeneo in tutto il risultato. Inoltre il fattore di scala e lo studio del sensore della macchina e della dimensione dei pixel è fondamentale per la definizione del “GSD” (ground sampling distance), fondamentale per il riconoscimento dei particolari nell’area osservata dalla camera.

È importante conoscere la “scala della mappa” del risultato richiesto dal committente perché influisce sulla scelta della strumentazione ottica e della piattaforma di volo da utilizzare.

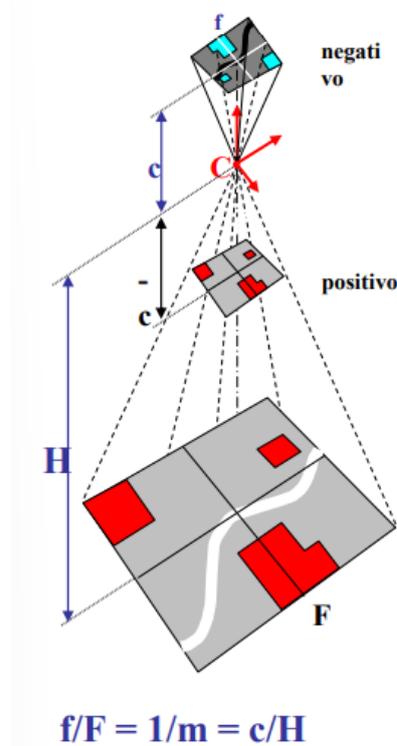


Figura 36: Fattore di scala, quota di volo e distanza focale.

Esistono 2 metodi per la risoluzione delle equazioni di collinearità:

Il metodo della “**fotogrammetria diretta**” prevede la sola conoscenza della posizione ed orientamento dei centri di presa della camera nel momento di acquisizione di tutti i fotogrammi. È sicuramente il metodo meno impegnativo in fase di acquisizione dati, ma il più complesso a livello progettuale. Infatti si necessitano i dati di orientamento e posizione di ogni fotogramma, calcolati da un **dispositivo IMU** (Inertial Measurement Unit) e integrati a dati di **posizionamento GNSS** mediante il filtro di Kalman, con una sincronizzazione delle scale temporali dei vari strumenti utilizzati (camera, ricevitore GNSS, piattaforma inerziale IMU).

Il metodo della “**triangolazione aerea**”, alla base della moderna fotogrammetria SfM (Structure from Motion), permette di calcolare i 6 parametri di orientamento esterno di tutti i fotogrammi note le coordinate immagine dei punti di legame (tie points), e le coordinate immagine e oggetto dei punti di appoggio detti anche **GCP** (Ground Control Points). Questo processo è noto come “**Bundle Block Adjustment**”, che analogamente al caso precedente utilizza 2 equazioni di collinearità generate per ciascun tie point. Questi vengono ricercati automaticamente dai software fotogrammetrici con processi di “**image matching**” basati sul calcolo di indici di correlazione. I punti di legame riconosciuti da queste tipologie di software sono migliaia e le incognite introdotte sono i 6 parametri di orientamento esterno e le 3 coordinate oggetto per ogni tie point. Sono necessari almeno 3 GCP affinché la nuvola di punti generata sia geolocalizzabile in un datum mediante i 7 parametri di rototraslazione di Helmert, ma generalmente si utilizzano più di 3 punti d’appoggio ben distribuiti spazialmente su tutta l’area di studio. I **QCPs** (Quality Control Points) o **CP** (Check Points) sono punti d’appoggio non utilizzati per la geolocalizzazione del modello ma solo per un controllo degli errori nel calcolo della nuvola di punti svolto dai software.

I software di **fotogrammetria SfM** (structure from motion) moderni sfruttano generalmente la combinazione dei due metodi di fotogrammetria diretta e triangolazione aerea per aumentare l’affidabilità del blocco fotogrammetrico e mitigare eventuali errori sistematici nelle due soluzioni.

Per un facile riconoscimento dei punti di appoggio in fase di elaborazione dati si utilizzano “**markers**” di dimensioni minime cinque GSD affinché siano ben riconoscibili. Le loro coordinate vengono misurate con tecniche GNSS, generalmente in nRTK, che in ambienti impervi può rappresentare sia un limite per gli operatori che un aumento delle tempistiche di rilievo.



Figura 37: Esempio di marker utilizzato per il monitoraggio del ghiacciaio del Rutor

Entrambi i metodi necessitano di un ulteriore processo detto “**calibrazione dei parametri di deformazione della camera**”. Nel processo si tengono conto delle deformazioni intrinseche alla geometria degli obiettivi, delle deformazioni dei materiali per variazioni di temperatura, delle condizioni di volo sito-specifiche e degli errori delle tecniche di rilievo utilizzate per l’appoggio delle varie aree del modello (presenza o meno di GCPs e/o posizione dei centri di presa, modalità di rilievo GNSS nRTK o stand alone). Se i parametri vengono calcolati dal programma con una stima ai minimi quadrati, allora la modalità di restituzione è detta “in flight” e ha la finalità di massimizzare la qualità del risultato, perdendo un vero e proprio significato fisico di sola distorsione della camera ma considerando anche gli errori con cui sono noti i punti di doppie coordinate. Per avere un vero significato fisico di sola distorsione è necessaria la calibrazione in modalità off-line in laboratorio, su un poligono di calibrazione di precisione, con software specifici e sistemi guidati di acquisizione dati e analisi dei risultati. Ciò permette di ottenere il “certificato di calibrazione” della camera fotografica.

I parametri di distorsione sono fino a 8: k_1, k_2, k_3 e k_4 (k_4 è utilizzato solo per camere fish-eye o grandangolari) sono i coefficienti di distorsione radiale, p_1 e p_2 sono i coefficienti di distorsione tangenziale, b_1 e b_2 di distorsione affine di scala e di taglio. Questi vengono inseriti nella curva di distorsione per il ricalcolo dei parametri di orientamento interno utilizzati nelle equazioni di collinearità, dove “r” è la distanza radiale dal centro.

$$\xi_{0,calibrato} = \xi_0 + \xi(k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) + p_1(r^2 + 2\xi^2) + 2p_2 \cdot \xi \cdot \eta + b_1 \cdot \xi + b_2 \cdot \eta$$

$$\eta_{0,calibrato} = \eta_0 + \eta(k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) + p_1(r^2 + 2\eta^2) + 2p_2 \cdot \xi \cdot \eta$$

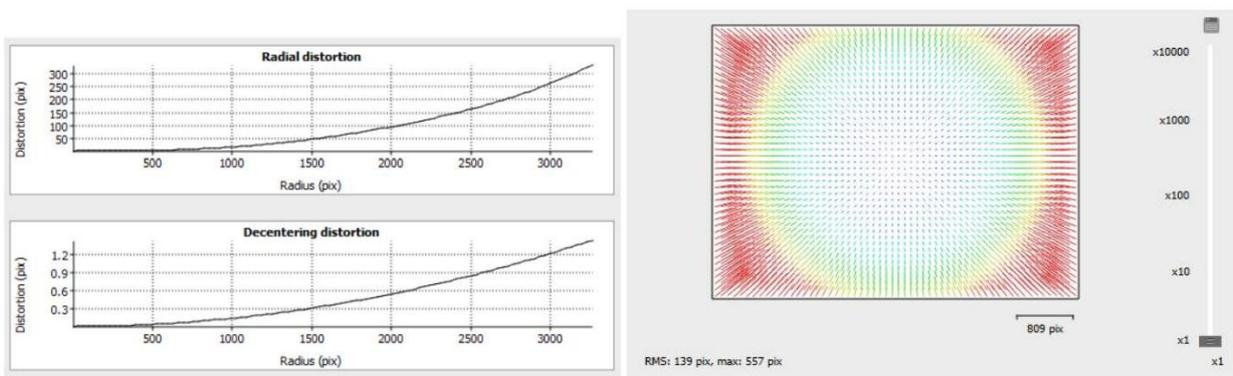


Figura 38: Esempio di curva di distorsione e Distorsion plot elaborate con il software Metashape.

Il risultato del processo fotogrammetrico non è la sola nuvola di punti, difatti da quest’ultima si possono generare **DEM** (Digital Elevation Models), **DTM** (Digital Terrain models), **DSM** (Digital Surface Models), che permettono la rappresentazione del target sotto forma di “**Raster**”, ovvero “immagini” i cui pixel rappresentano la quota dell’area rilevata, geolocalizzati mediante la conoscenza delle coordinate dei punti del Virtual Outcrop (nuvola di punti densa) da cui hanno origine. Dalle misure fotogrammetriche è possibile derivare anche “**fotografie rettificate**” note come **ortofoto** (ortomosaici o ortofotopiani o ortofotocarte o fotopiani). I fotopiani sono una proiezione ortogonale dell’oggetto in analisi, che permette una rappresentazione cartografica in forma di immagine digitale georeferenziata esente dalla deformazione geometrica intrinseca della proiezione centrale dei fotogrammi. Sono il risultato dell’operazione di raddrizzamento svolta con le equazioni di omografia se l’oggetto è piano, altrimenti si ricorre all’operazione di ortoproiezione: per ogni pixel dell’ortofoto si determinano le coordinate planimetriche (E,N), mediante un modello altimetrico (DEM/DSM) si interpola la quota e si proietta il punto 3D sull’immagine (ξ, η) ; successivamente si determinano i DN (Digital Numbers) da associare alla

posizione immagine mediante ricampionamento e ad ogni pixel dell'ortofoto si associano i DN corrispondenti ai valori RGB del target.

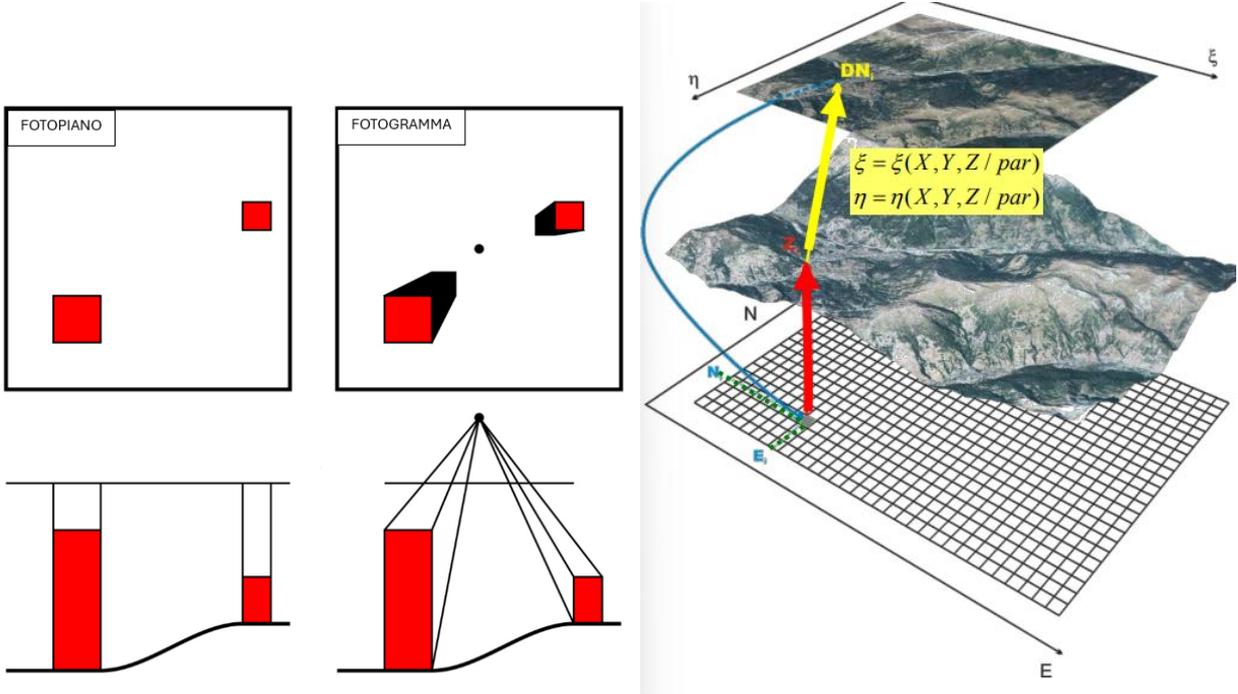


Figura 39: Fotogramma, Fotopiano, e rappresentazione dell'operazione di ortoproiezione.

4.1. Fotogrammetria da aereo, piani di volo e prodotti cartografici dei voli della ditta DigiSky

Da settembre 2020 al settembre 2024 il monitoraggio fotogrammetrico del ghiacciaio del Rutor è svolto in collaborazione con l'azienda **DigiSky**, una società con sede a Torino, certificata dall'ESA e che svolge un servizio di fotogrammetria di media/grande scala da aereo. L'azienda ha oltre 20 anni di esperienza nella mappatura aerea per vari scopi, tra cui l'analisi termica delle città, il monitoraggio di infrastrutture e di rischi ambientali su larga scala.



Figura 40: Aereo utilizzato dall'azienda Digisky per l'acquisizione dei dataset fotogrammetrici

Gli uffici e la flotta aerea aziendale sono ubicati presso l'Aeroporto Aeritalia di Torino (LIMA) e con voli di poco più di due ore riesce a svolgere il rilievo completo del ghiacciaio, con decollo e atterraggio a Torino (Digisky, 2021). L'utilizzo di queste tipologie di piattaforme consente di allargare enormemente le dimensioni dell'area monitorata con una riduzione sensibile delle tempistiche. Necessita di strumentazioni di calcolo, di posizionamento e camere fotogrammetriche fortemente specifiche e all'avanguardia. Solitamente l'obiettivo per le aziende che svolgono fotogrammetria da aereo è una restituzione con il metodo di “**fotogrammetria diretta**”, anche se per problematiche tecniche il “rilievo di dettaglio fotogrammetrico” è stato integrato con un “rilievo d'appoggio” mediante markers le cui coordinate sono state rilevate con tecniche nRTK. L'aereo che ha effettuato i voli fotogrammetrici è dotato di un'**antenna GNSS**, di **2 unità inerziali IMU** e di una **fotocamera PhaseOne** montata sotto l'ala destra. Per l'utilizzo corretto della strumentazione installata è fondamentale sincronizzare le scale temporali in modo da far coincidere i dati di posizionamento con l'acquisizione del fotogramma.

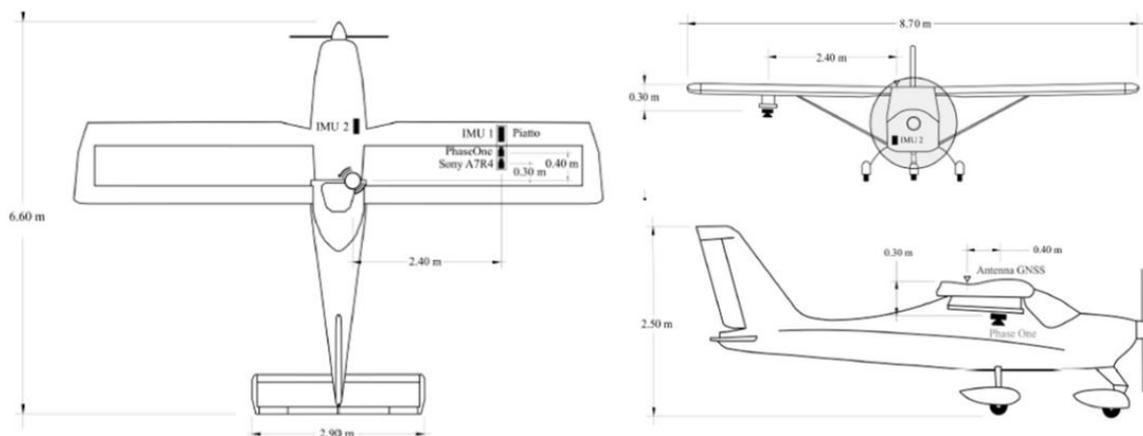


Figura 41: Strumentazione installata sul veivolo Digisky e geometrie per la rototraslazione dei dati misurati nel centro di presa della camera

La fotocamera **PhaseOne** (iXM-RS150F) illustrata nella figura 42 è una camera fotogrammetrica digitale di medio formato, con una lunghezza focale di 50 mm, una dimensione del sensore di 40 x 53,5 mm e una risoluzione di 151,3 MPx (1 pixel= 3.75microm).



Figura 42: Camera Phase One iMX-RS150F

Il ghiacciaio Rutor è stato sorvolato da Digisky ogni settembre dal 2020:

- **2020** : Il primo volo si è svolto il 30 settembre 2020, dalle ore 10:30 alle 11:30 (ora locale GMT +2). L'area esaminata è la più piccola dei vari voli, comprende il ghiacciaio nel suo completo dalla testa del Rutor a 3500 m s.l.m., ma esclude l'area del Lago dei Seracchi e il Rifugio Deffeyes. L'altitudine relativa media del volo era di 946 m dal suolo con una risoluzione a terra di 7 cm/pix e un'area coperta di 25,2 km², con una scala media di 1:20.000.

- **2021**: Il secondo volo si è svolto il 13 settembre 2021, dalle 9:40 alle 11:10 (ora locale GMT +2). Questo volo è stato preceduto dalla campagna del 6-8 settembre per il posizionamento dei Markers nella parte alta del ghiacciaio. Le immagini acquisite sono 848 e coprono un'area maggiore rispetto all'anno precedente, estendendosi dal Rifugio Deffeyes nei pressi dei Laghi Serac e Margherita

fino alla testa del ghiacciaio. L'altitudine del volo era di 877 m dal suolo, con una risoluzione a terra di 6 cm/pix e un'area coperta di 34,5 km², con una scala media dei fotogrammi di 1:18.000.

- **Integrazione del volo 2021:** A causa della presenza di nuvole sopra la cima del ghiacciaio del Rutor, è stato effettuato un volo parziale il 30 settembre 2021, dalle 9:20 alle 9:40 (ora locale GMT +2). Questo volo ha prodotto 202 immagini.

- **2022:** Il terzo volo si è svolto il 10 Settembre 2022, dalle 9.09 alle 9.55 (ora locale GMT +2). Anche questo volo è stato preceduto da una campagna di posizionamento di markers che ha permesso l'elaborazione del modello con 9 punti d'appoggio a terra. Le immagini acquisite sono 628 e coprono un'area maggiore rispetto all'anno precedente, espandendo l'acquisizione in direzione di valle. L'altitudine del volo era di circa 974 m con una risoluzione al suolo di 7,45 cm/pix e una scala media dei fotogrammi di 1:20.000.

- **2023:** Il quarto volo si è svolto l'8 settembre 2023, dalle 10.52 alle 11.46 (ora locale GMT +2). Anche questo volo è stato preceduto da una campagna di posizionamento di markers che ha permesso l'elaborazione del modello con 17 punti d'appoggio a terra di cui 7 utilizzati come QCP. Le immagini acquisite sono 671 e coprono un'area maggiore rispetto all'anno precedente, espandendo l'acquisizione a 58 km². L'altitudine del volo era di circa 1.2 Km con una risoluzione al suolo di 8.95 cm/pix e una scala media dei fotogrammi leggermente minore di 1:24.000.

- **2024:** Il quinto volo si è svolto il 10 settembre 2024, dalle 11.30 alle 12.21 (ora locale GMT +2). I GCP utilizzati sono 17, come nel volo precedente. Le immagini acquisite sono 628 e coprono un'area maggiore rispetto al 2023, espandendo l'acquisizione a 65,2 Km². L'altitudine del volo era di circa 1,2 Km con una risoluzione al suolo di 9 cm/pix e una scala media dei fotogrammi di 1:24.000.

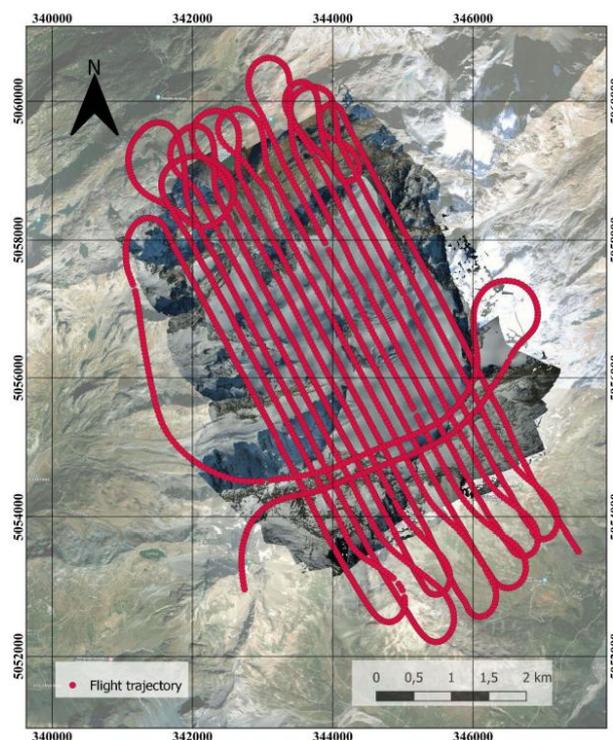


Figura 43: Esempio di traiettoria di volo elaborata con tecnica nRTK utilizzando la stazione base Rumiod della rete interregionale SPIN3

Dall'elaborazione dei dataset acquisiti sono state estrapolate Nuvole di Punti Dens e i prodotti cartografici di Digital Elevation Model e ortofoto (figure 44-45-46-47-48-49-50-51-52-53).

I prodotti estraibili hanno **GSD** leggermente variabili, dato che il numero e grado di sovrapposizione dei fotogrammi varia tra i rilievi, e nel processo elaborativo ne conseguono differenti densità nelle nuvole di punti. Questo comporta la necessità di estrarre i prodotti con un GSD maggiore per poterli confrontare tra loro e si è scelto 0.5 m. Ciò ha permesso di ottenere un buon compromesso tra un modello sufficientemente dettagliato e non troppo pesante da un punto di vista computazionale. Naturalmente sarebbe possibile estrarre prodotti con risoluzioni più elevate.

Dal volo 2020 il GSD delle ortofoto risulta di 0.07 m e del DSM risulta 0.14 m; dal volo 2021 il GSD delle ortofoto risulta 0.06 m e del DSM 0.24 m; dal volo 2022 il GSD delle ortofoto risulta 7.45 cm e del DSM 29.8 cm ; dal volo 2023 il GSD delle ortofoto risulta 10 cm e del DSM 17.9 cm; dal volo 2024 il GSD delle ortofoto risulta circa 10 cm e del DSM 18.1 cm.

Il datum di riferimento con cui sono stati estratti i prodotti è **RDN2008 / UTM zone 32N (N-E)**. I prodotti cartografici visibili nelle seguenti pagine sono stati elaborati precedentemente dal gruppo di ricerca Glacier Lab, e su di essi sono state svolte operazioni di verifica, ricampionamento, analisi di qualità e variazioni multitemporali.

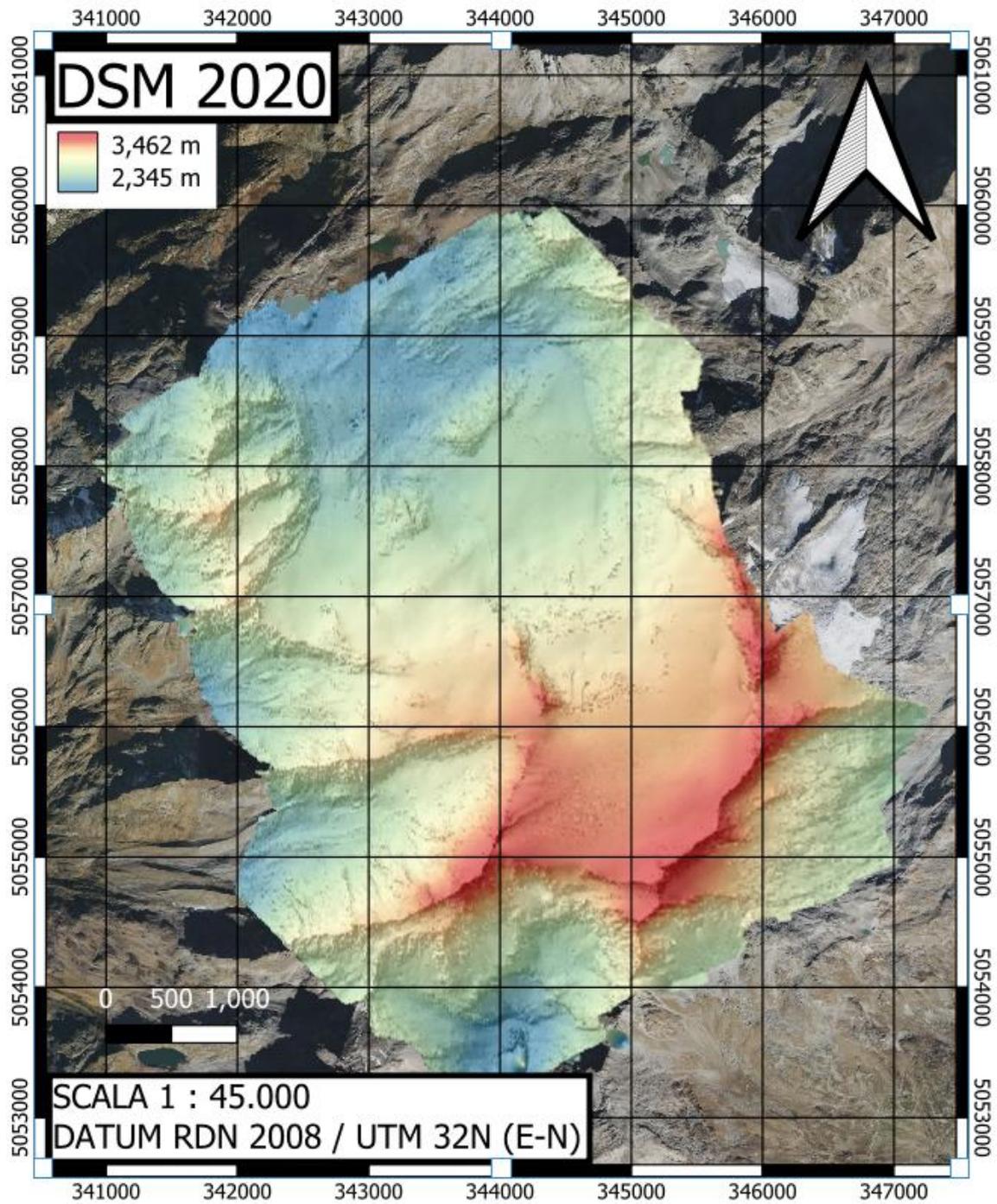


Figura 44: DSM 2020

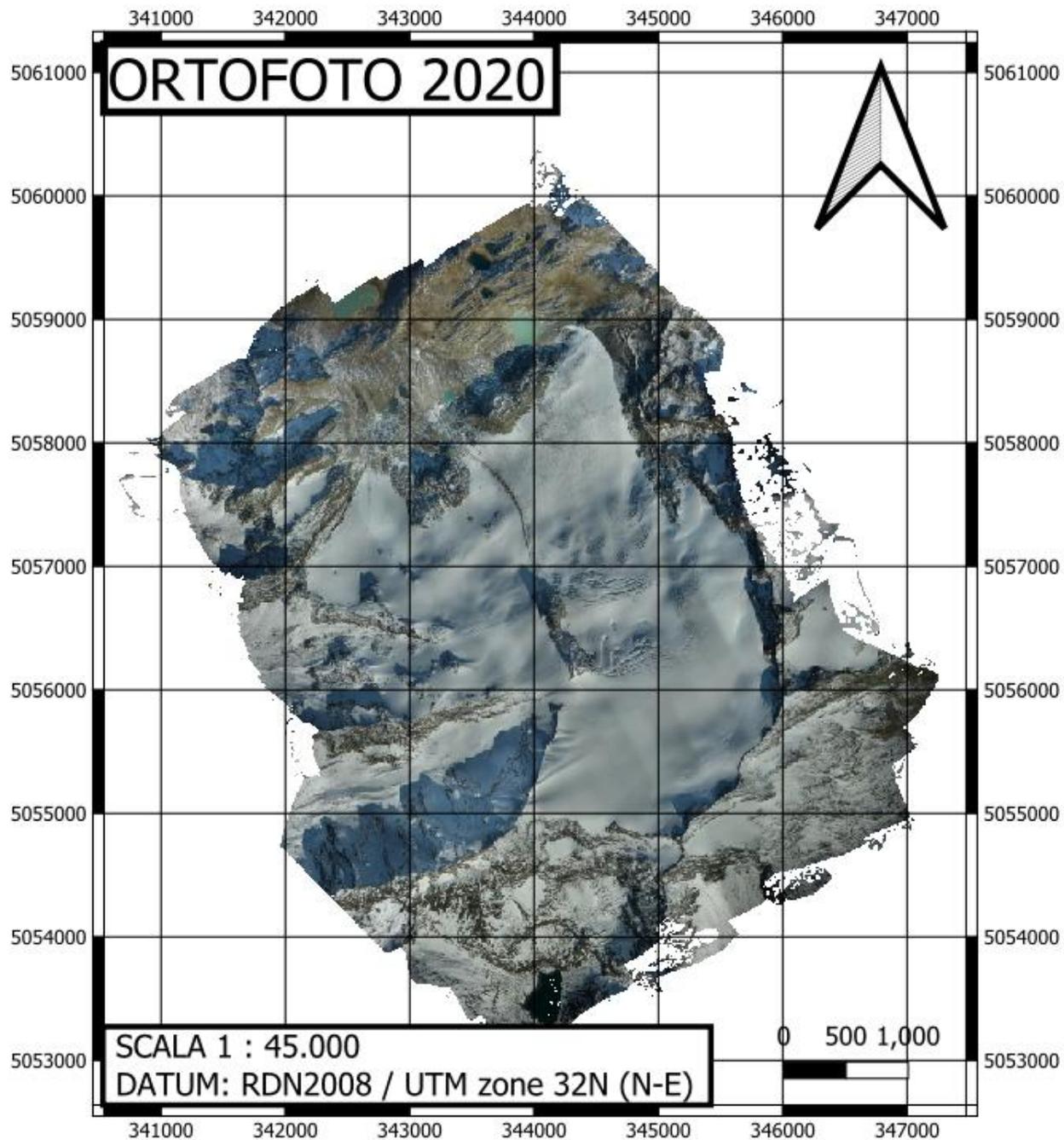


Figura 45: Ortomosaico 2020

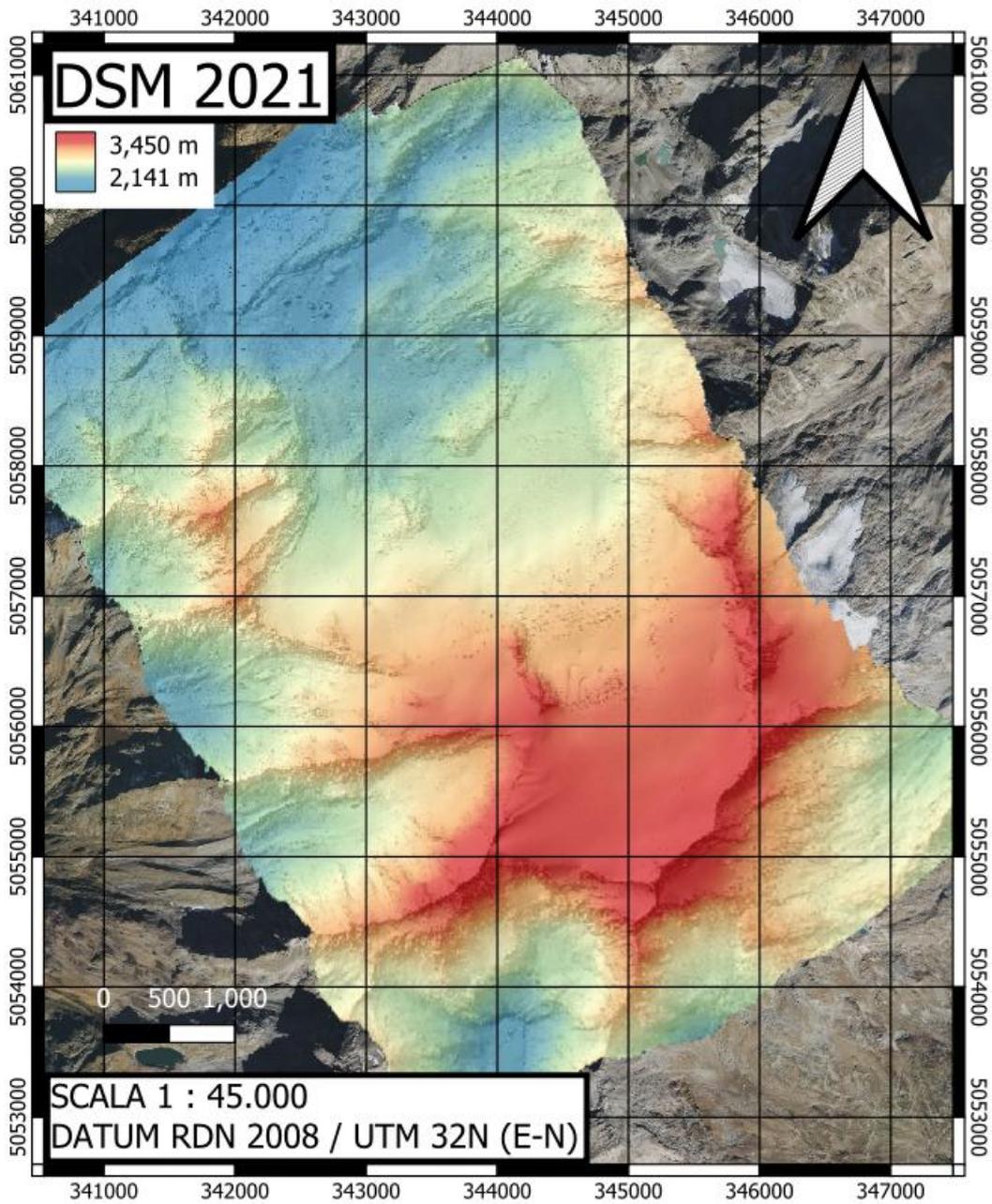


Figura 46: DSM 2021

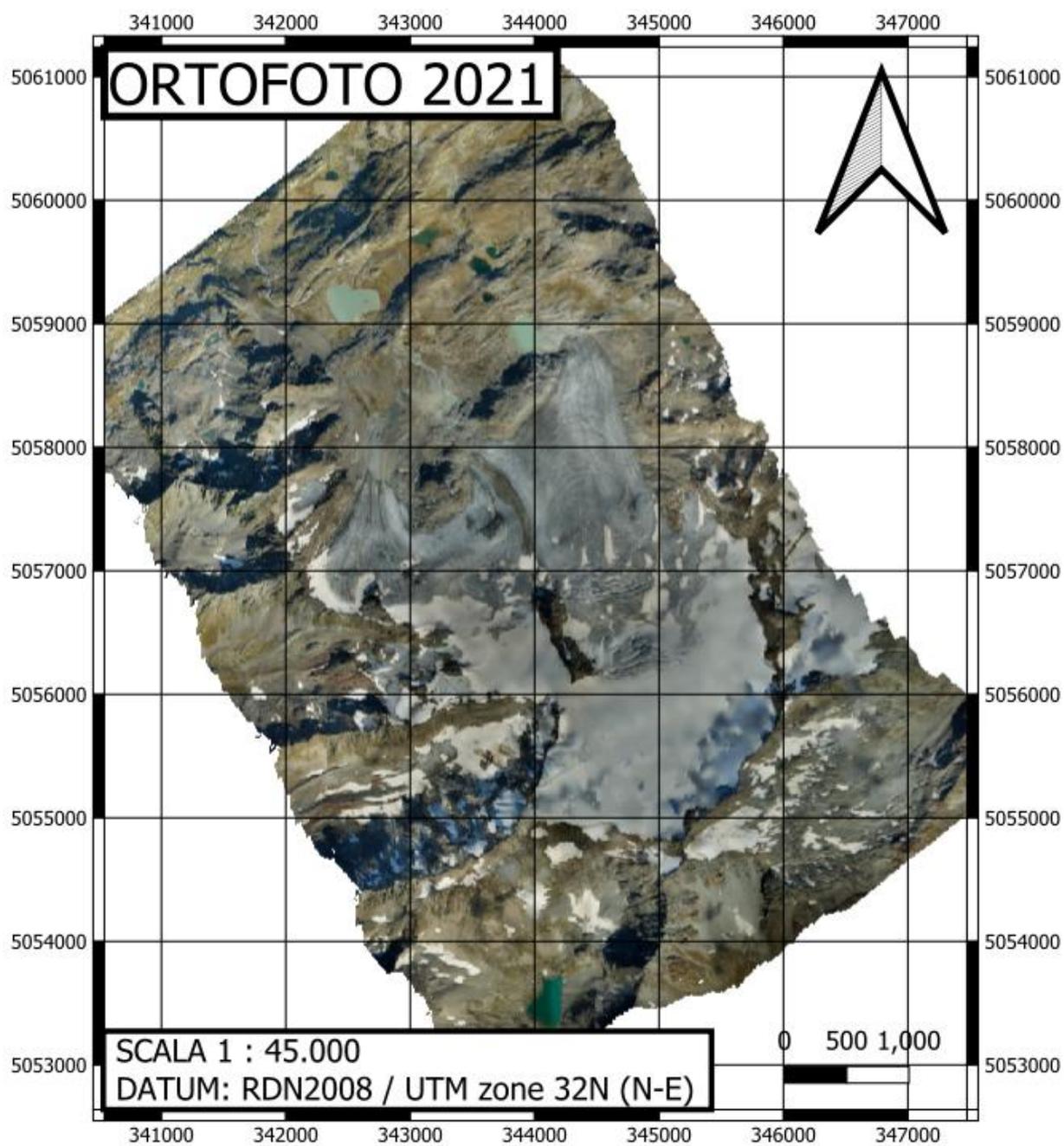


Figura 47: Ortomosaico 2021

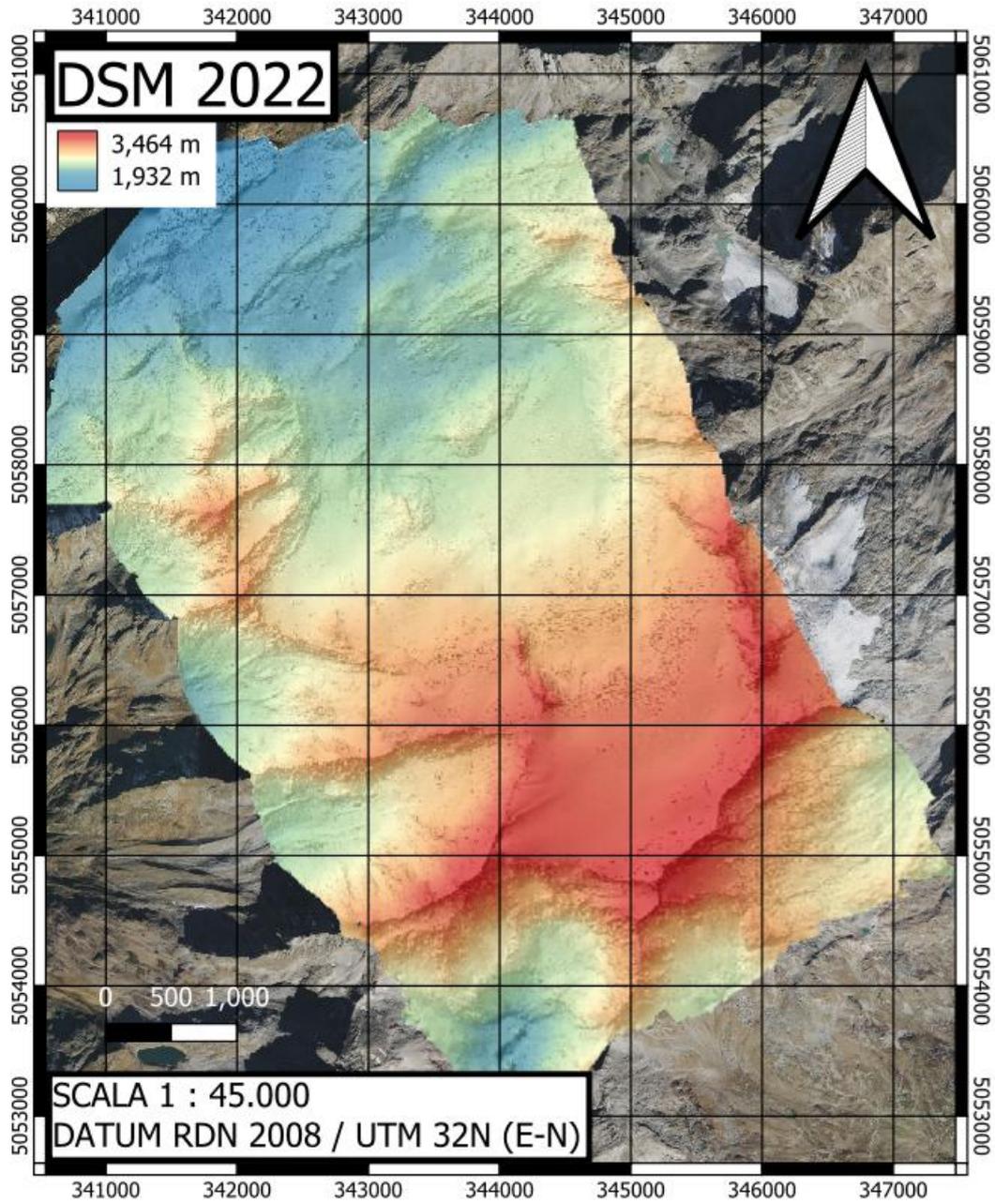


Figura 48: DSM 2022

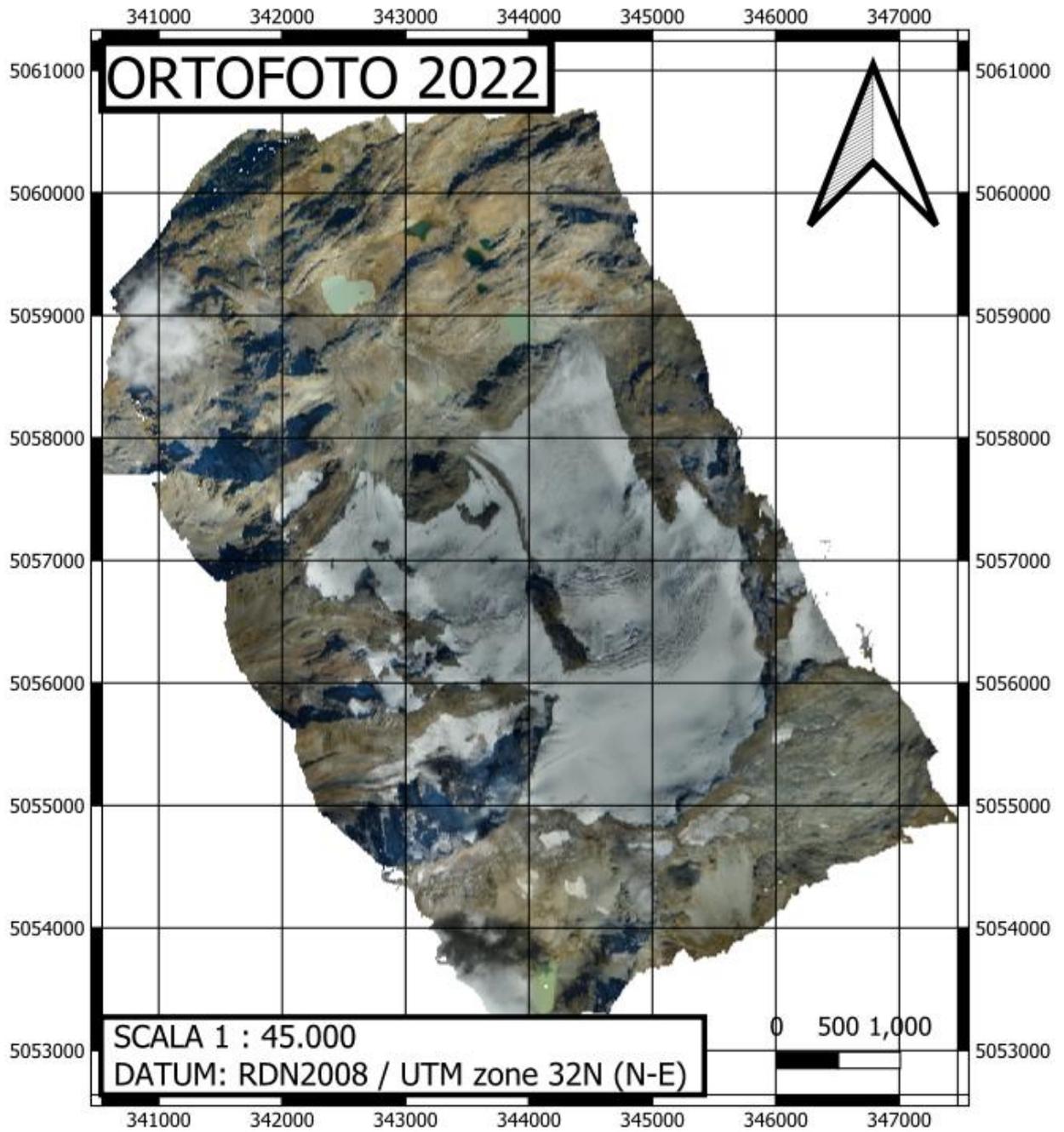


Figura 49: Ortomosaico 2022

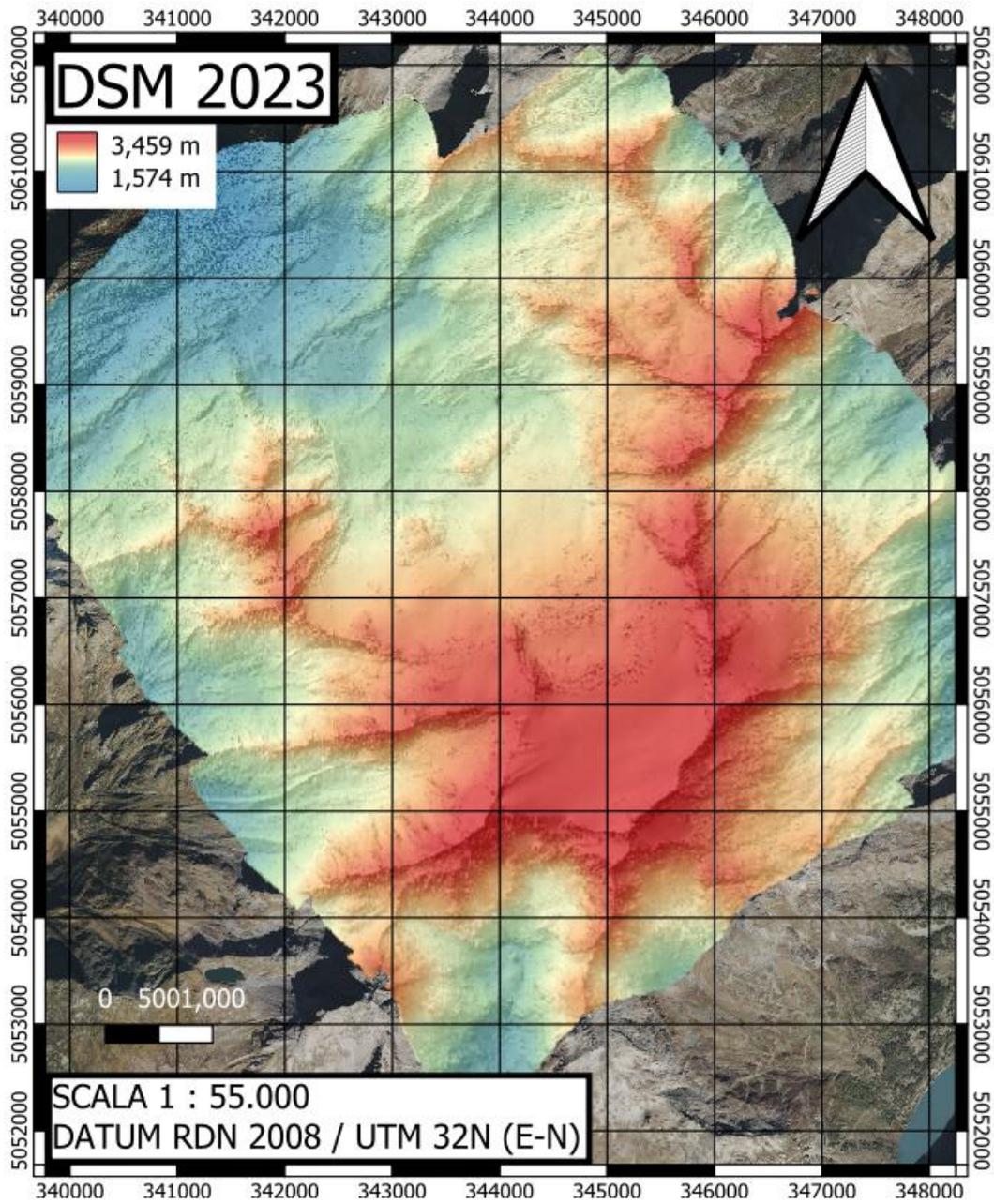


Figura 50: DSM 2023

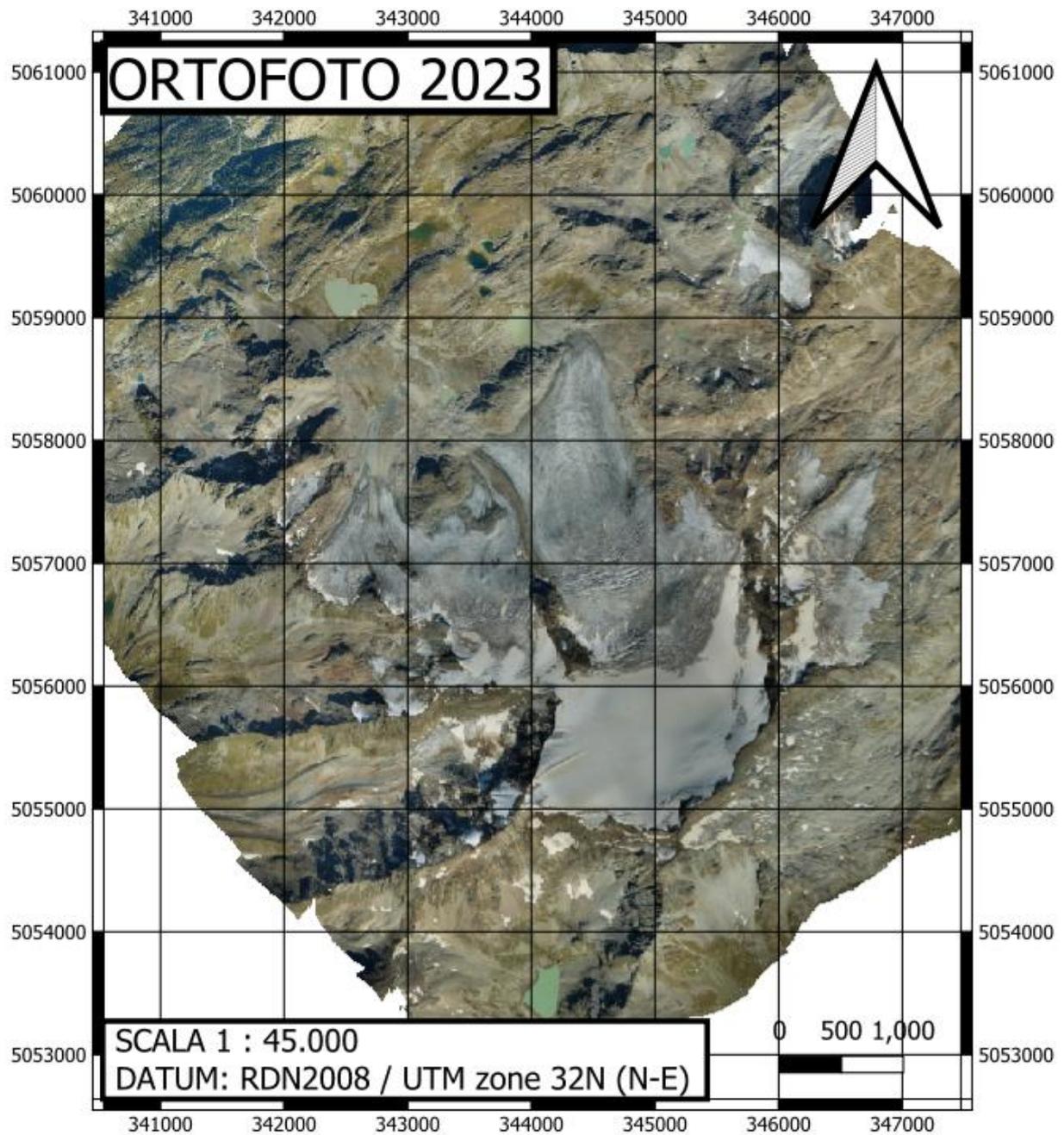


Figura 51: Ortomosaico 2023

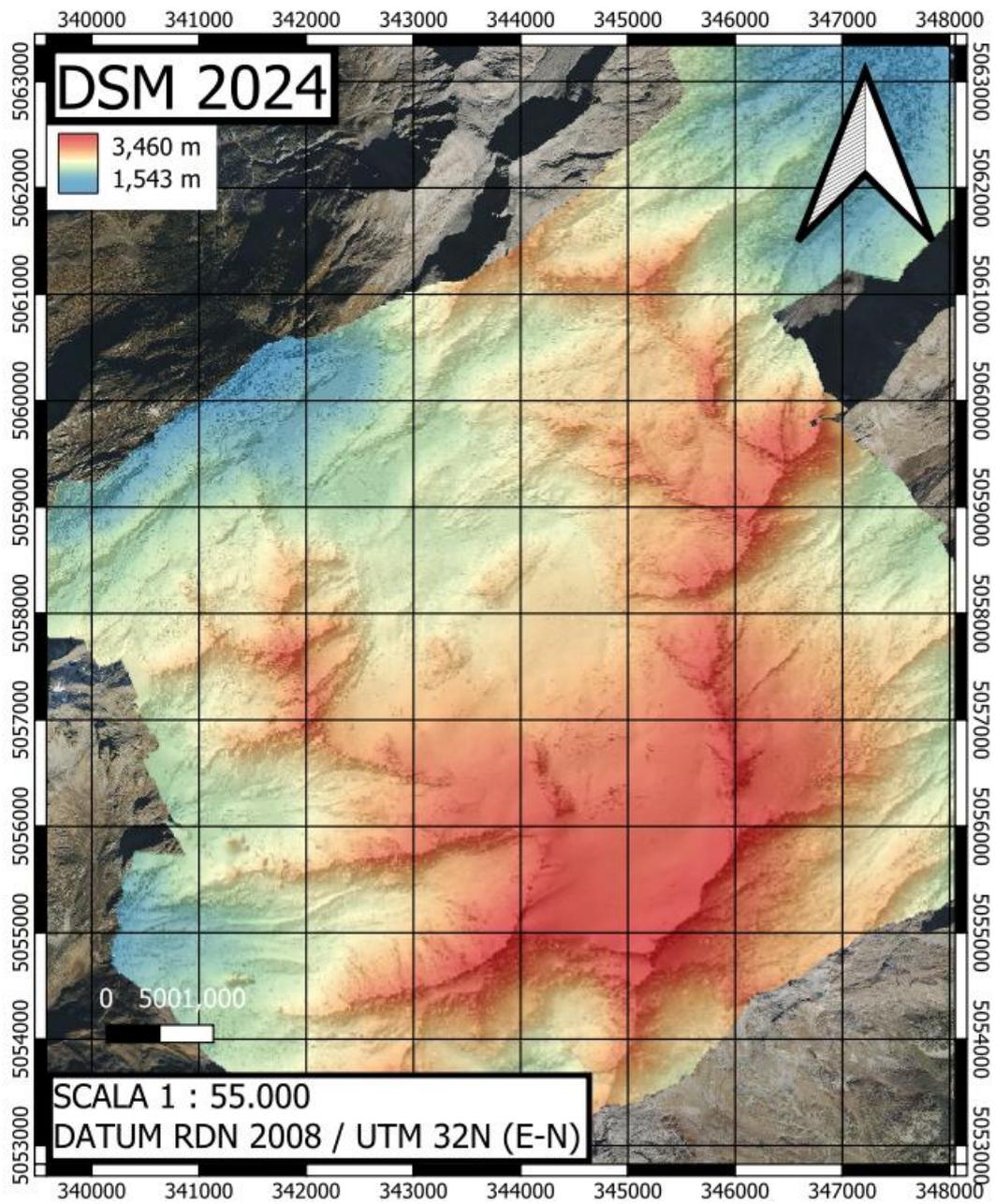


Figura 52: DSM 2024

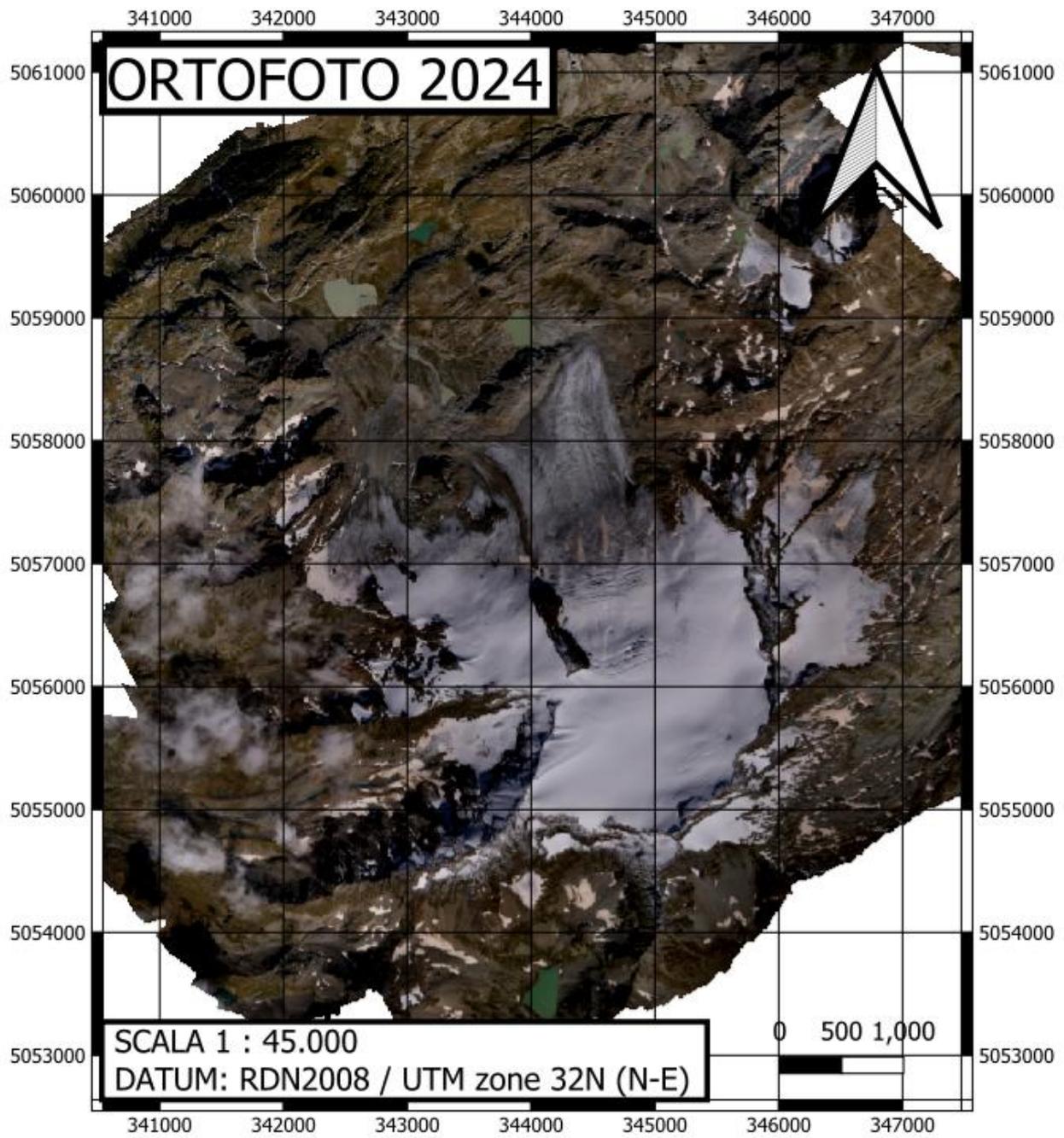


Figura 53: Ortomosaico 2024

5. ANALISI MULTITEMPORALE DEL GHIACCIAIO DEL RUTOR

5.1. QGis e Matlab

Per svolgere l'analisi multi-temporale del ghiacciaio del Rutor si sono utilizzati il software QGIS e il software Matlab con il quale sono stati sviluppati diversi script.

QGIS, precedentemente chiamato Quantum GIS, è un software GIS open source fortemente utilizzato in diversi ambiti per la sua continua evoluzione. Permette di essere riprogrammato per rispondere a specifiche esigenze dell'utenza con un approccio back-and-forward comunitario, rendendo così disponibile una libreria tool estremamente ampia e in continuo miglioramento, includendo altri progetti open source come GRASS GIS e SAGA GIS. I software GIS (Geographic Information systems) permettono la gestione di dati geo-riferiti consentendone la memorizzazione, organizzazione, elaborazione, analisi, interpolazione, confronto e restituzione in mappe e cartografie. I dati si suddividono in due categorie:

- i “**dati vettoriali**” sono una rappresentazione spaziale di dataset con confini discreti mediante punti, linee e poligoni. Il formato più comune è lo shapefile;
- i “**dati Raster**” sono una rappresentazione del dataset mediante una griglia regolare di celle, utili nel caso l'area in esame sia in continuo cambiamento come possono essere i prodotti restituiti da tecniche fotogrammetriche ed immagini satellitari. I DSM ed ortofoto sono un tipico esempio di dato Raster fortemente utilizzati in queste tipologie di software. Ogni cella della matrice, che nel caso di immagini digitali è chiamata Pixel, è georeferenziata in un sistema di riferimento e ha un valore associato chiamato Digital Number (DN). Nel caso delle immagini a colori ogni pixel contiene l'informazione radiometrica delle 3 bande rosso, verde e blu (RGB), e può avere diverse risoluzioni radiometriche in base al numero di valori di DN che può assumere. I formati più comuni sono file .tiff, .jpeg, .raw ecc...

Per l'analisi dei dati cartografici del ghiacciaio del Rutor il software QGIS si è rivelato molto utile nei processi di analisi foto-interpretativa, per la restituzione di risultati geo-riferiti e nel tracciamento e analisi dei profili del ghiacciaio.

Il secondo software utilizzato è **Matlab**, piattaforma di programmazione e di computazione numerica che permette la gestione, analisi e modellazione di grandi quantità di dati. È un software

fortemente specializzato nel calcolo matriciale e consente la creazione di script per la programmazione. Per lo studio dei dati cartografici è stato fondamentale per i processi di analisi statistica e per la creazione di metodici automatici di analisi dei dataset, permettendone una gestione trasparente e non “black box” (a scatola chiusa) come sono molti processi di calcolo svolti da QGis.

5.2. Analisi dei profili del ghiacciaio

5.2.1. Introduzione

Per comprendere la variabilità spaziale e temporale dell'evoluzione morfologica in altimetria del ghiacciaio sono stati tracciati **20 profili omogeneamente distribuiti** su tutta la massa glaciale, in direzione sia longitudinale che trasversale all'asse vallivo, affinché palesino in modo significativo i processi di ablazione e di possibile accumulo.

PROFILI

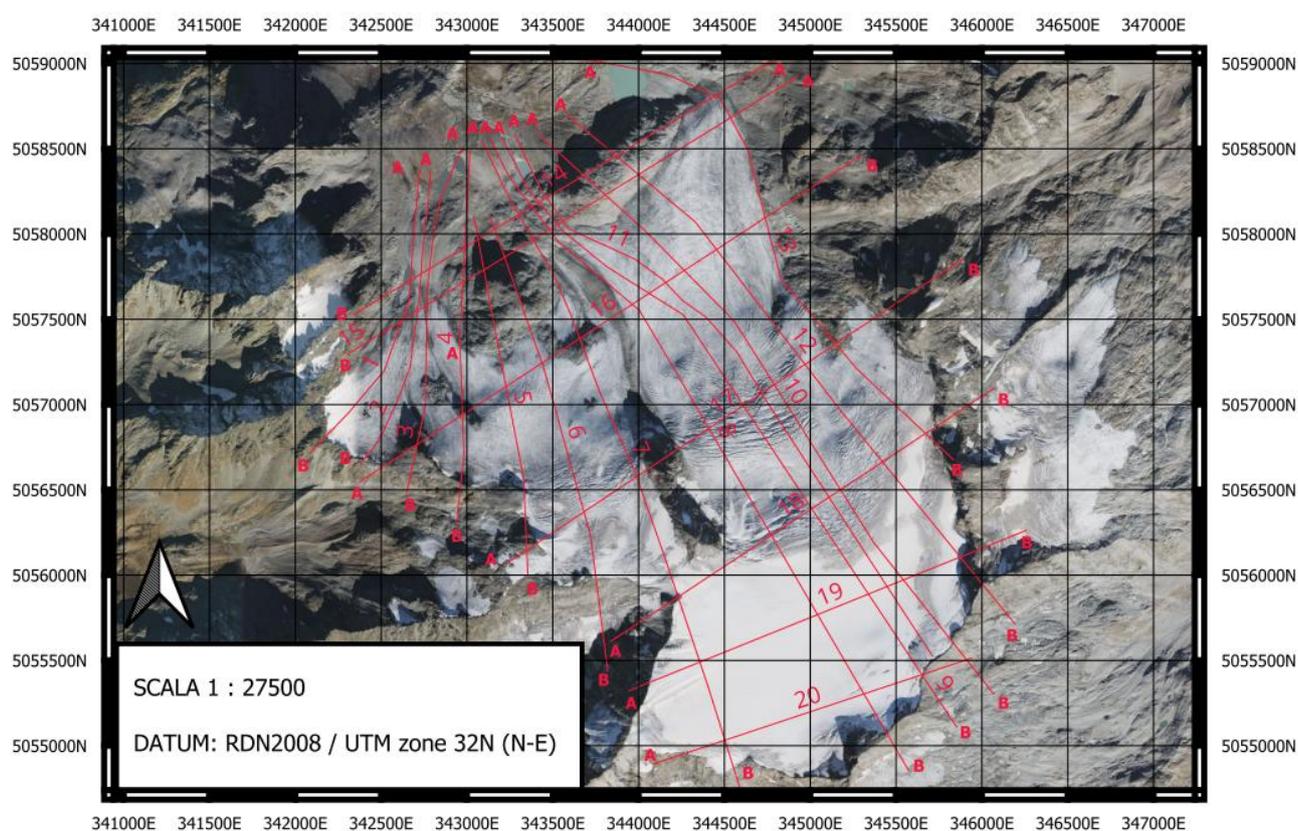


Figura 54: Profili tracciati per l'analisi del ghiacciaio del Rutor, ortogonali e trasversali all'asse vallivo. La progressione longitudinale dei seguenti profili è rappresentata nella direzione A-B

L'analisi dei profili ha consentito di comprendere con un'analisi locale i processi di ritiro ed accumulo nelle varie aree soggette a diverse pendenze, esposizioni e andamenti del bed-rock sottostante, che ne influenza fortemente le variazioni. Inoltre ha permesso di comprendere meglio il mutamento delle aree più pendenti centrali, in cui sono presenti i crepacci in continuo spostamento e trasformazione, e di avere successivamente negli altri processi di analisi dei capitoli

successivi un approccio foto-interpretativo più efficace, essendo esso basato su valutazioni soggettive.

Sono stati utilizzati i prodotti cartografici del rilievo fotogrammetrico Digisky che coprono l'intervallo temporale 2020-2024 e il rilievo Lidar da aereo svolto nel 2008 dalla Regione Valle d'Aosta.

I **DSM** utilizzati per la generazione dei profili sono di diverse origini e con precisioni a terra (GSD) differenti. Il più vecchio risale al 2008 scaricabile dal Geoportale della regione Valle d'Aosta e georiferito al datum UTM zone 32N - ED50 (EPSG: 23032). È caratterizzato da una risoluzione spaziale di 2m e ha permesso di avere un dato antecedente ai voli DigiSky, consentendo un'analisi più ampia come visibile nel calcolo delle differenze di quota 2008-2020 e 2008-2024. I DSM generati dal 2020 al 2024 con i voli Digisky invece sono stati estratti con lo stesso GSD di 0.5 m e si presuppone che il dato abbia un'accuratezza simile data l'origine dallo stesso processo fotogrammetrico e condizioni al contorno.

I profili sono stati generati con il tool Qgis "**Profile tool**", applicando la massima risoluzione. Per svolgere il confronto tra i prodotti cartografici con diversa risoluzione spaziale, si è applicato un processo di interpolazione con il software Matlab al fine di poter confrontare i dataset con lo stesso numero di dati. Per analizzarne il comportamento del ghiacciaio lungo il profilo ed associarlo alle dinamiche di ablazione e ritiro si è calcolata la differenza di quota tra i vari anni.

5.2.2. Analisi dei profili

I **profili 1,2,3,4** descrivono la lingua sinistra del ghiacciaio (area occidentale), circondata dalla cresta che unisce la Cima de Loydon e la Cima de L'Invernet.. A causa della morfologia del territorio e delle marcate acclività del complesso geologico, l'area rappresenta in modo coerente una zona di ablazione alla base ed è priva di un vero bacino di accumulo.

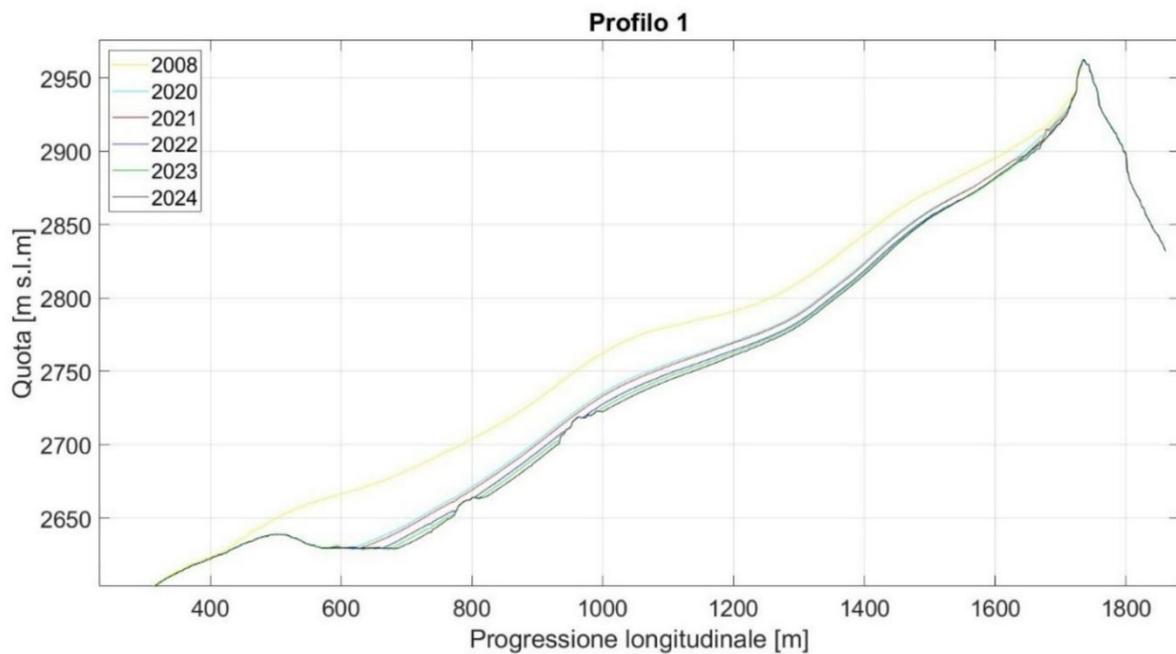


Figura 55: Profilo 1, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

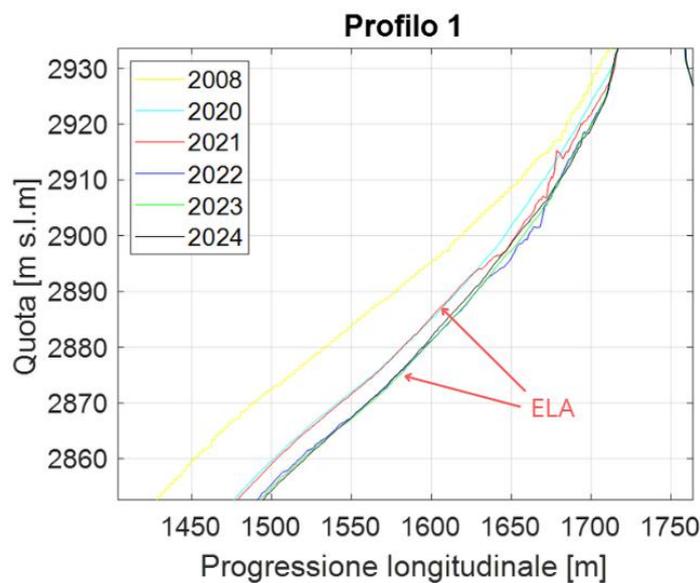


Figura 56: Profilo 1, ingrandimento sulle linee di equilibrio.

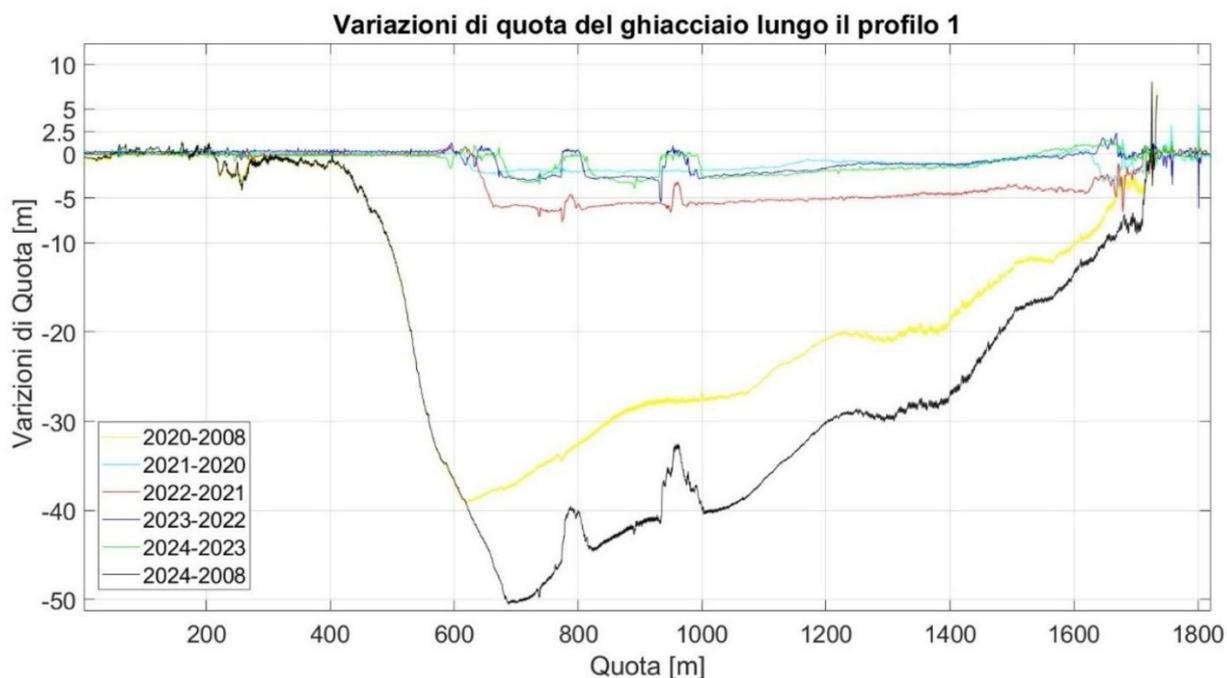


Figura 57: Differenze di quota del Profilo 1, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 1** è rappresentata la lingua occidentale, dove è chiaramente visibile il processo di ritiro per la morfologia piana del bed-rock. Nel lasso temporale 2020-2024, l'arretramento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. La linea di equilibrio è visibile tra i rilievi 2022-2023 (2890m s.l.m.) e 2023-2024 (2885m s.l.m.), e non è presente tra i rilievi 2020-2021 e 2021-2022. Le variazioni di quota sono calcolate mediante la sottrazione tra profili, e le differenze maggiori sono accentuate nell'area del fronte (2022/2021 -6m, 2024/2008 -50m) e diminuiscono con l'aumentare della quota. Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024 pur essendoci stato un processo di accumulo si è verificato un processo ablativo ben visibile. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

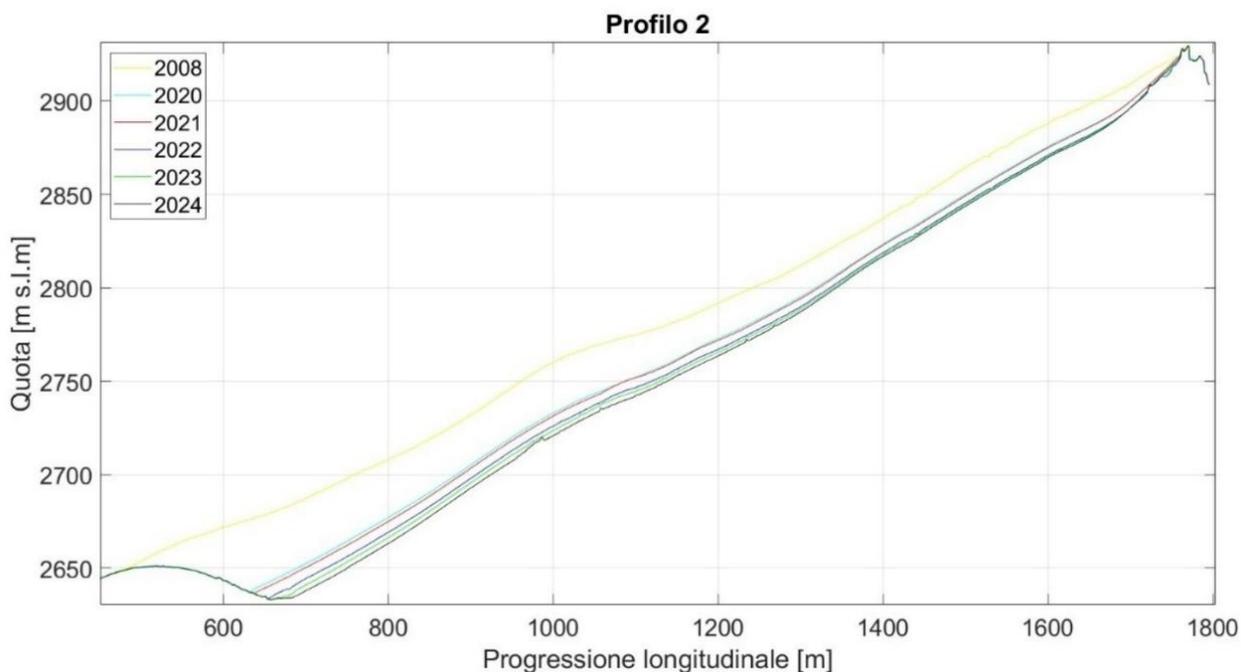


Figura 58: Profilo 2, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

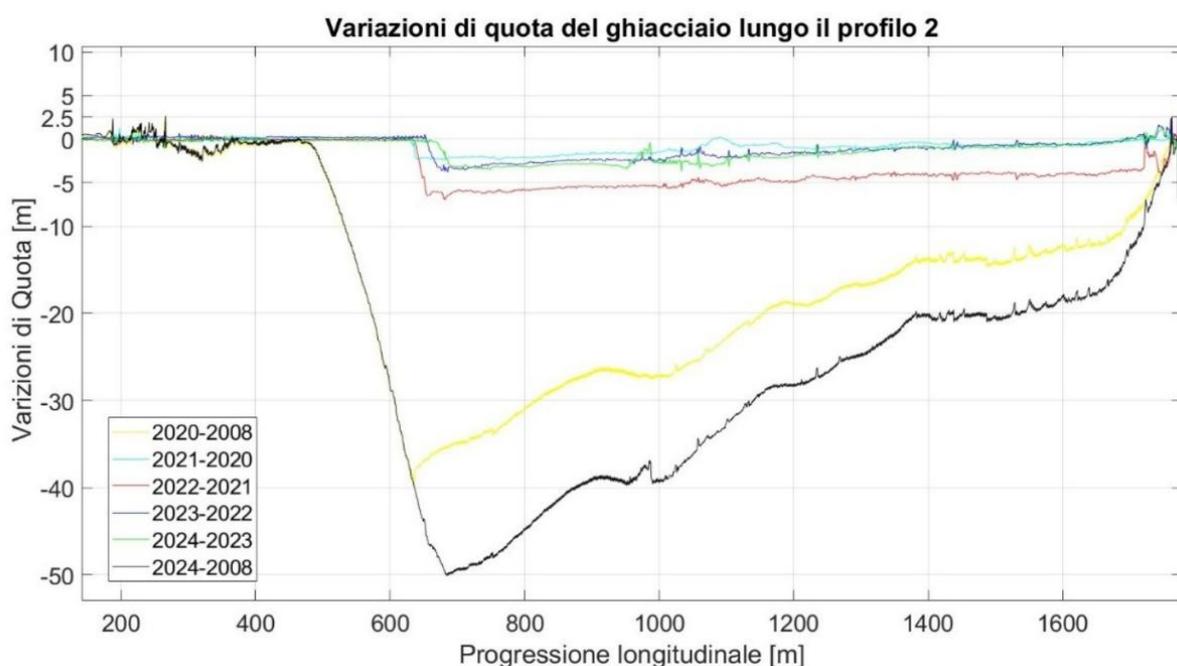


Figura 59: Differenze di quota del Profilo 2, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 2** è rappresentata la lingua occidentale ed è fortemente visibile il processo di ritiro per la morfologia piana del bed-rock. Nel lasso temporale 2020-2024, l'arretramento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. La linea di equilibrio è visibile tra i rilievi 2022-2023 (2890m s.l.m.) e 2023-2024 (2890m s.l.m.), i profili 2020-2021 e 2021-2022 non presentano un punto di intersezione. Le variazioni di quota maggiori sono nell'area del fronte

(2022/2021 -6m, 2024/2008 -50m) e diminuiscono con l'aumentare della quota. Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024, pur essendoci stato un processo di accumulo, si è verificato un processo ablativo ben visibile. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

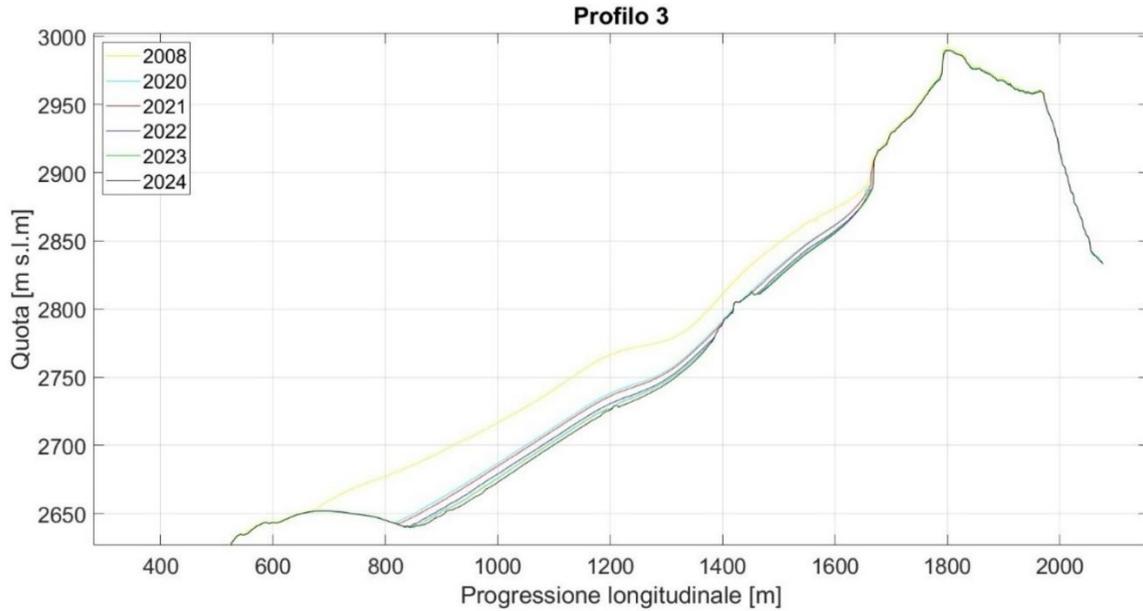


Figura 60: Profilo 3, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

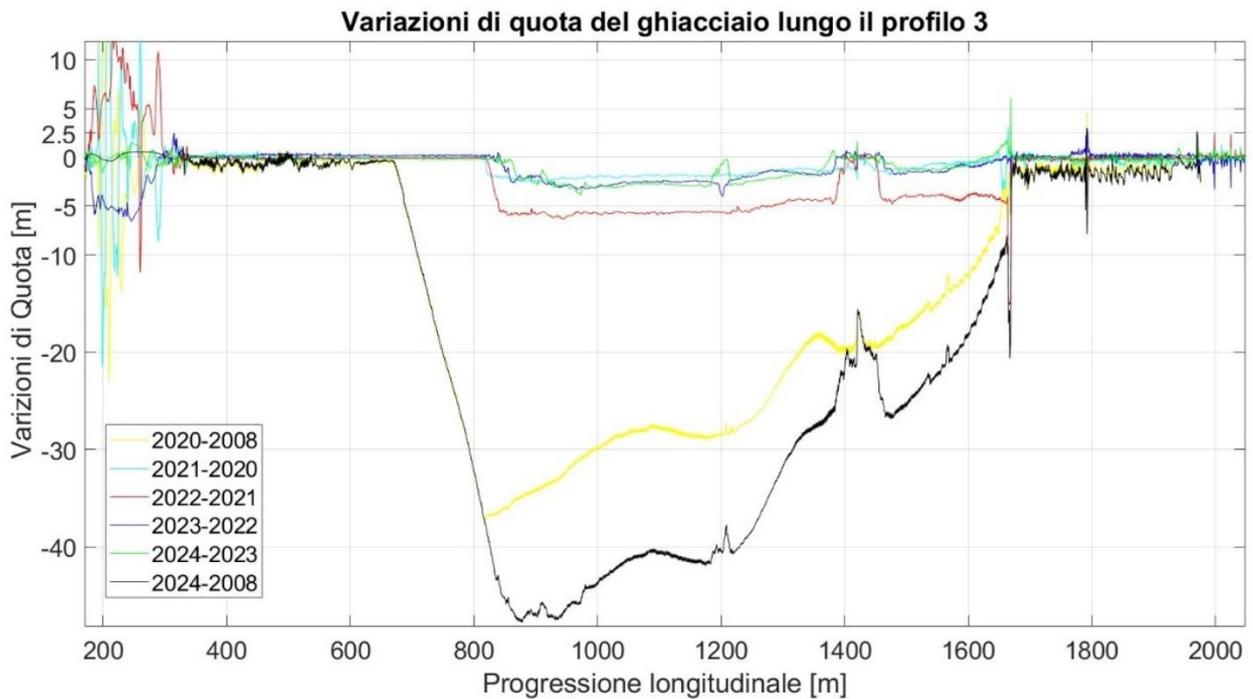


Figura 61: Differenze di quota del Profilo 3, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 3**, come nei profili precedenti, è fortemente visibile il processo di ritiro per la morfologia piana del bed-rock. Le fluttuazioni alle quote minori sono dovute ad errori di restituzione del rilievo fotogrammetrico per la presenza di un lago periglaciale e la zona più alta è fortemente influenzata dalle forti pendenze del Col de Loydon. Nel lasso temporale 2020-2024 l'arretramento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. La linea di equilibrio è visibile tra i rilievi 2022-2023 (2885m s.l.m.) e 2023-2024 (2875m s.l.m.) e i profili

2020-2021 e 2021-2022 non presentano un punto di intersezione. Le variazioni di quota maggiori sono nell'area del fronte (2022/2021 -6m, 2024/2008 -50m) e diminuiscono con l'aumentare della quota. Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024 pur essendoci stato un processo di accumulo si è verificato un processo ablativo ben visibile. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

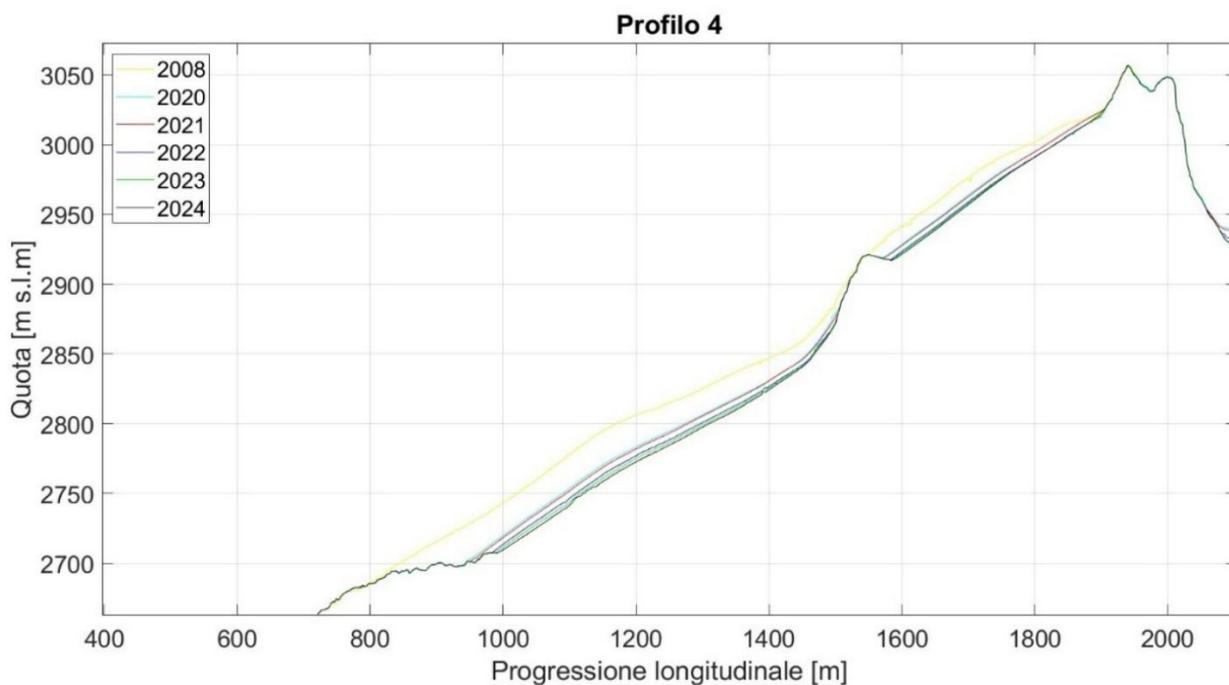


Figura 62: Profilo 4, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

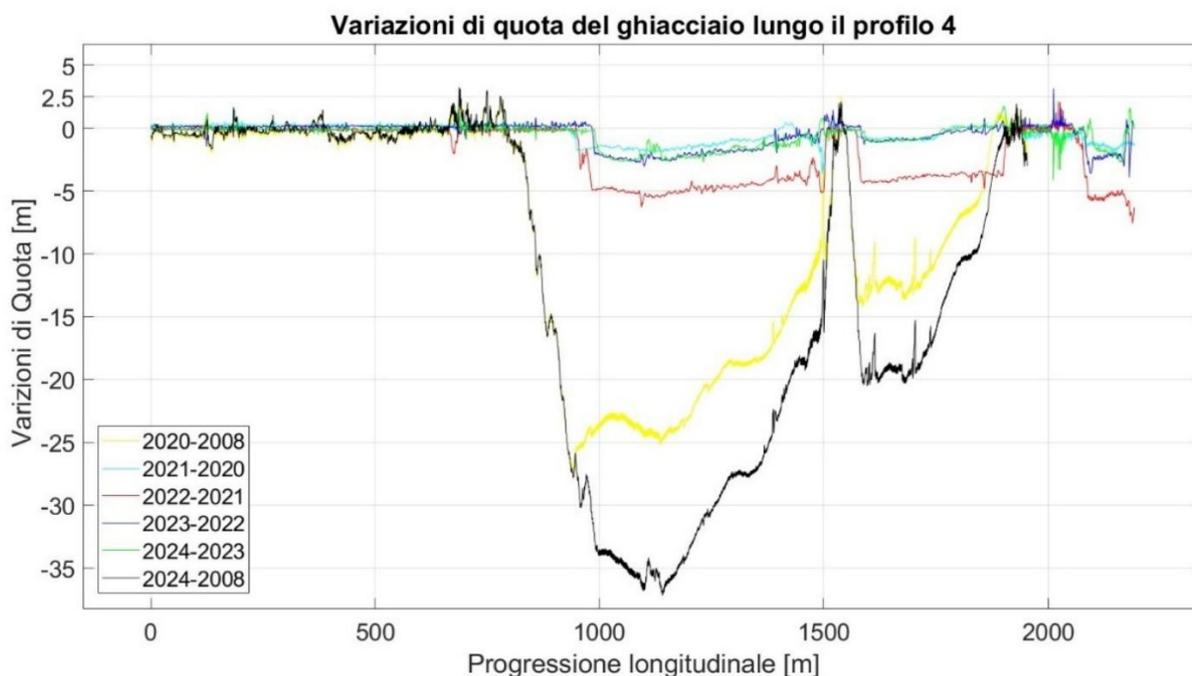


Figura 63: Differenze di quota del Profilo 4, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 4**, come nei profili precedenti, è fortemente visibile il processo di ritiro per la morfologia del bed-rock e la zona più alta è fortemente influenzata dalle forti pendenze del Col de Loydon. Nel lasso temporale 2020-2024 l'arretramento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. La linea di equilibrio è visibile tra i rilievi 2020-2021 (2990m s.l.m.),

e 2023-2024 (2990m s.l.m.), e i profili del 2021-2022 e 2022-2023 non presentano un punto di intersezione. Le variazioni maggiori di quota sono accentuate nell'area del fronte (2022/2021: -5m, 2024/2008: -35m), anche se minori rispetto ai profili precedenti, e diminuiscono con l'aumentare della quota. Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024 pur essendoci stato un processo di accumulo si è verificato un processo ablativo fortemente accentuato. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

I **profili 5,6,7** descrivono la parte occidentale del ghiacciaio caratterizzata dai rilievi che lo dividono dalla zona dei laghi periglaciali insediati nelle morene sottostanti. Le pendenze nella direzione di monte riducono fortemente il processo di ritiro in confronto alle aree circostanti. Inoltre per la presenza di forti acclività nella parte sommitale non è ben visibile il bacino di accumulo.

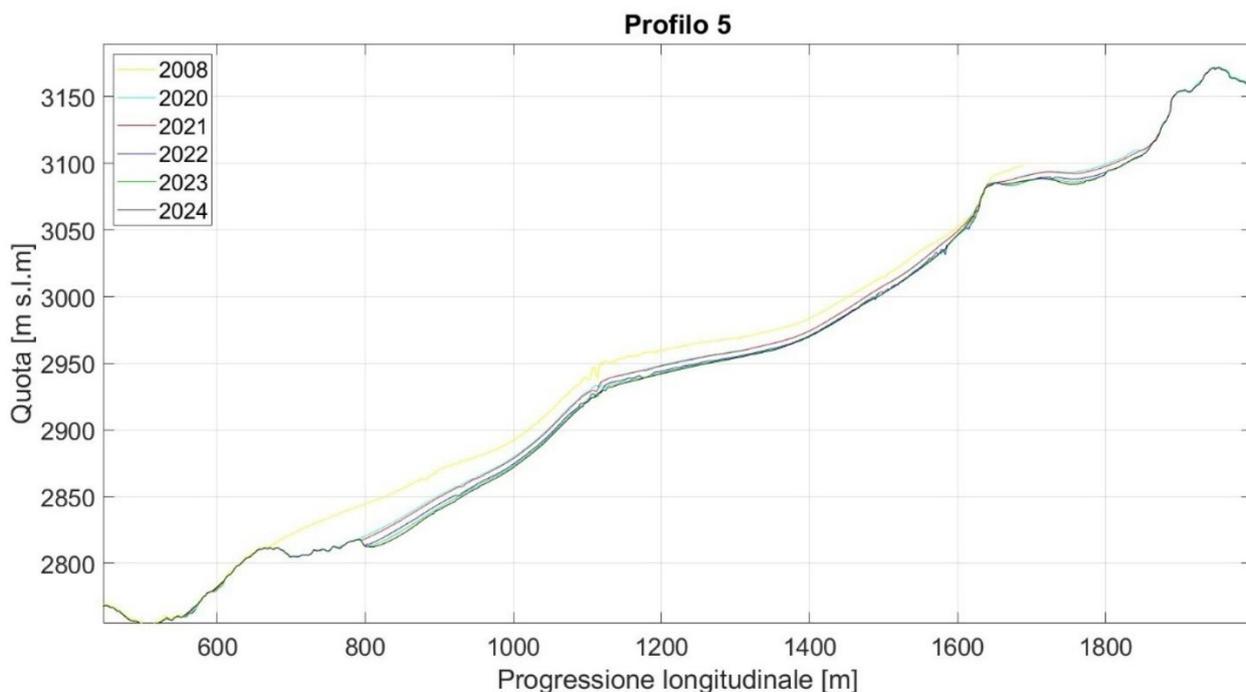


Figura 64: Profilo 5, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

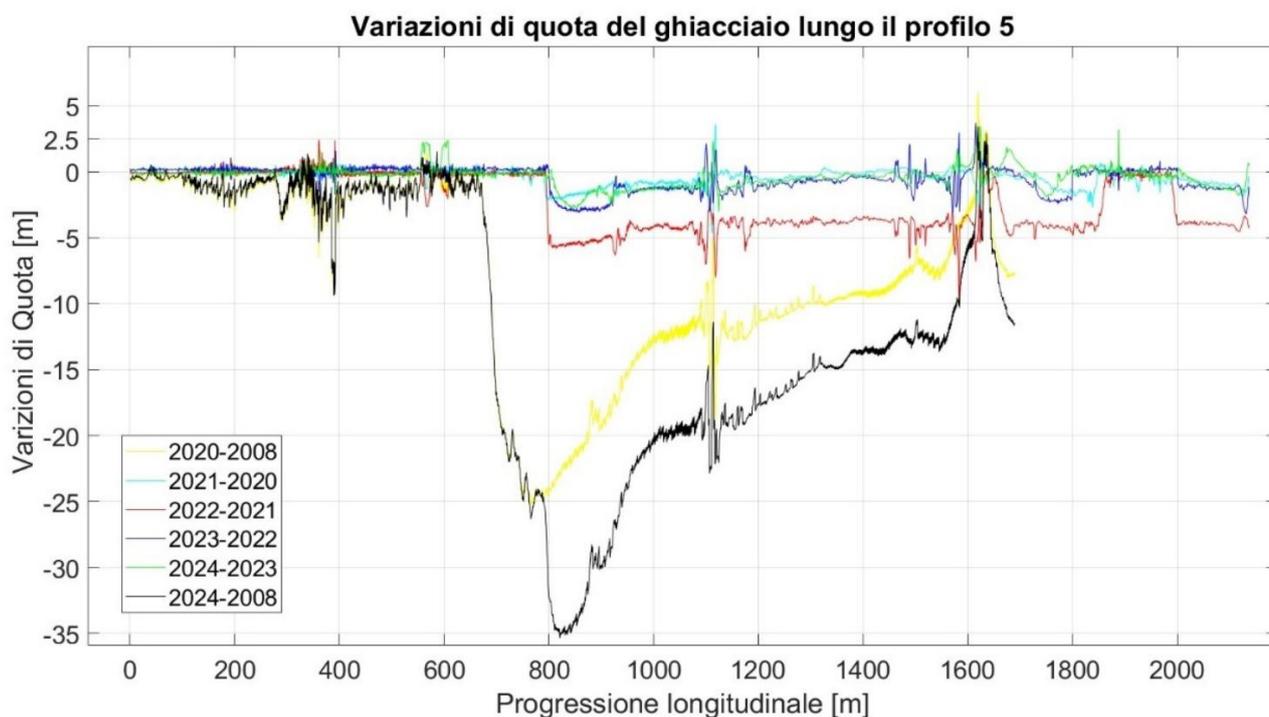


Figura 65: Differenze di quota del Profilo 5, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 5** è rappresentata l'area centro occidentale del ghiacciaio. Il processo di ritiro è ancora riconoscibile, ma inizia a diminuire per la presenza dei rilievi che dividono la lingua orientale con il lobo centrale. La zona più alta è influenzata dalle pendenze del Col de Loydon, ma minore in confronto ai profili precedenti. Nel lasso temporale 2020-2024 l'arretramento più accentuato si è

verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. La linea di equilibrio è visibile tra i rilievi 2020-2021 (2990m s.l.m.), e 2023-2024 (2990m s.l.m.), i profili del 2021-2022 e 2022-2023 non presentano un punto di intersezione. Le variazioni di quota maggiori sono accentuate nell'area del fronte (2022/2021: -5m, 2024/2008: -35m) e diminuiscono con l'aumentare della quota. Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024 pur essendoci stato un processo di accumulo si è verificato un processo ablativo fortemente accentuato. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

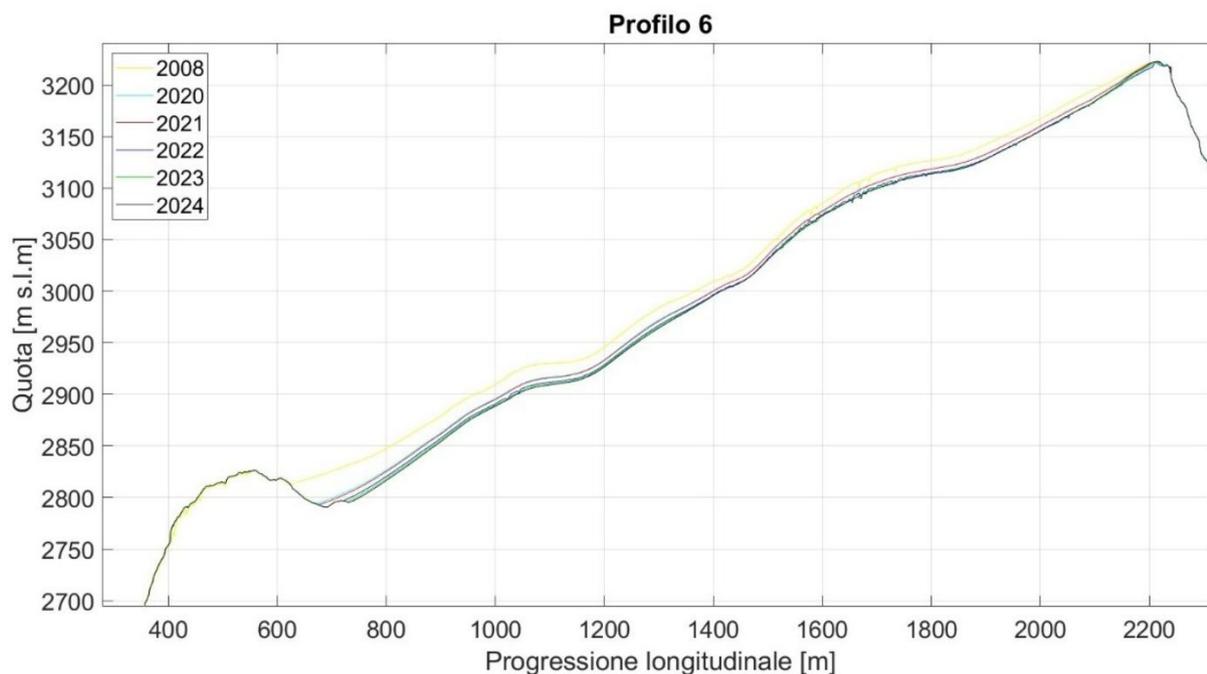


Figura 66: Profilo 6, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

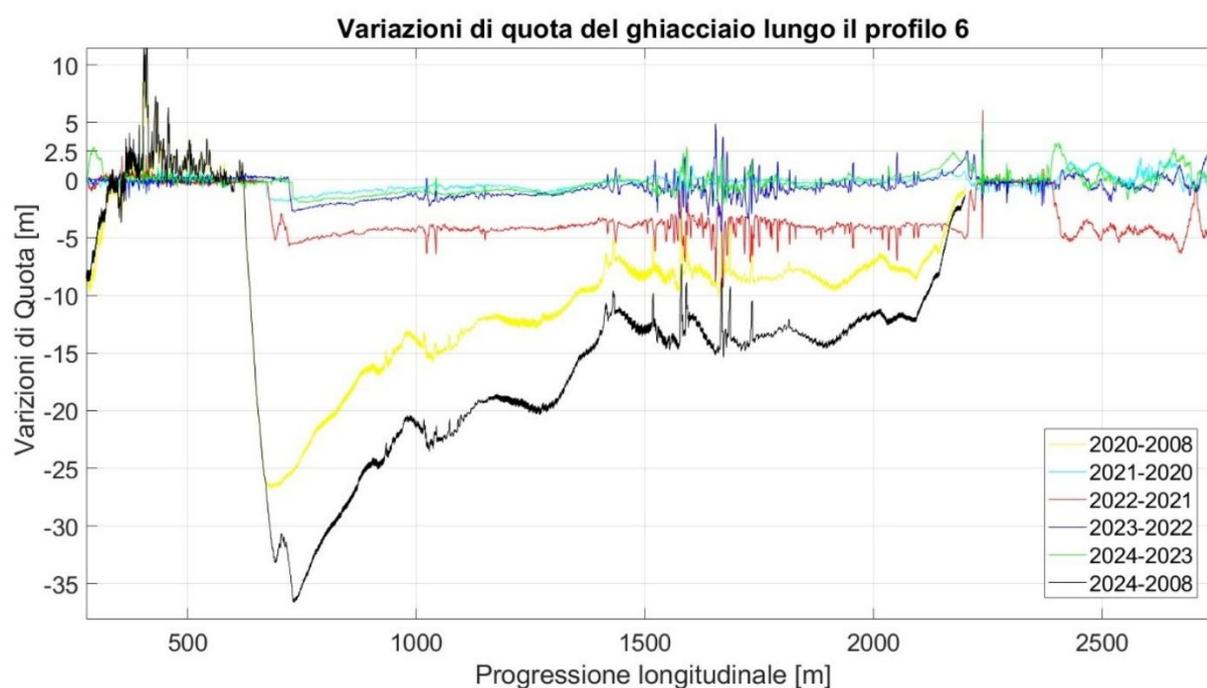


Figura 67: Differenze di quota del Profilo 6, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 6** il processo di ritiro è ancora riconoscibile, ma minore rispetto ai profili precedenti per la morfologia dei rilievi sul fronte. La zona più alta non è più influenzata dalle pendenze del Col de Loydon, infatti si inizia a riconoscere la presenza del plateau che caratterizza la parte alta del ghiacciaio. Nel lasso temporale 2020-2024 l'arretramento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. La linea di equilibrio è visibile tra i rilievi 2023-2024 (3100m

s.l.m.), i profili del 2020-2021, 2021-2022 e 2022-2023 non presentano un punto di intersezione. Le variazioni maggiori di quota sono accentuate nell'area del fronte (2022/2021: -5m, 2024/2008: -35m) e diminuiscono con l'aumentare della quota. Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024, pur essendoci stato un processo di accumulo, si è verificato un processo ablativo fortemente accentuato. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

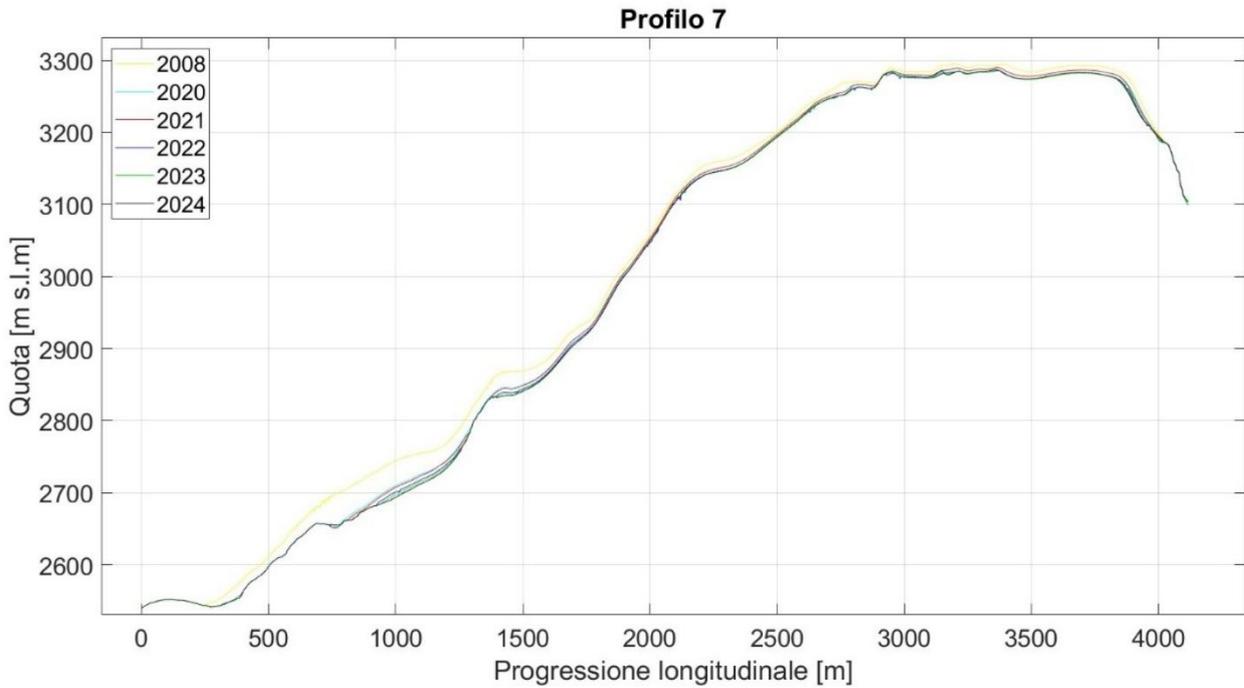


Figura 68: Profilo 7, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

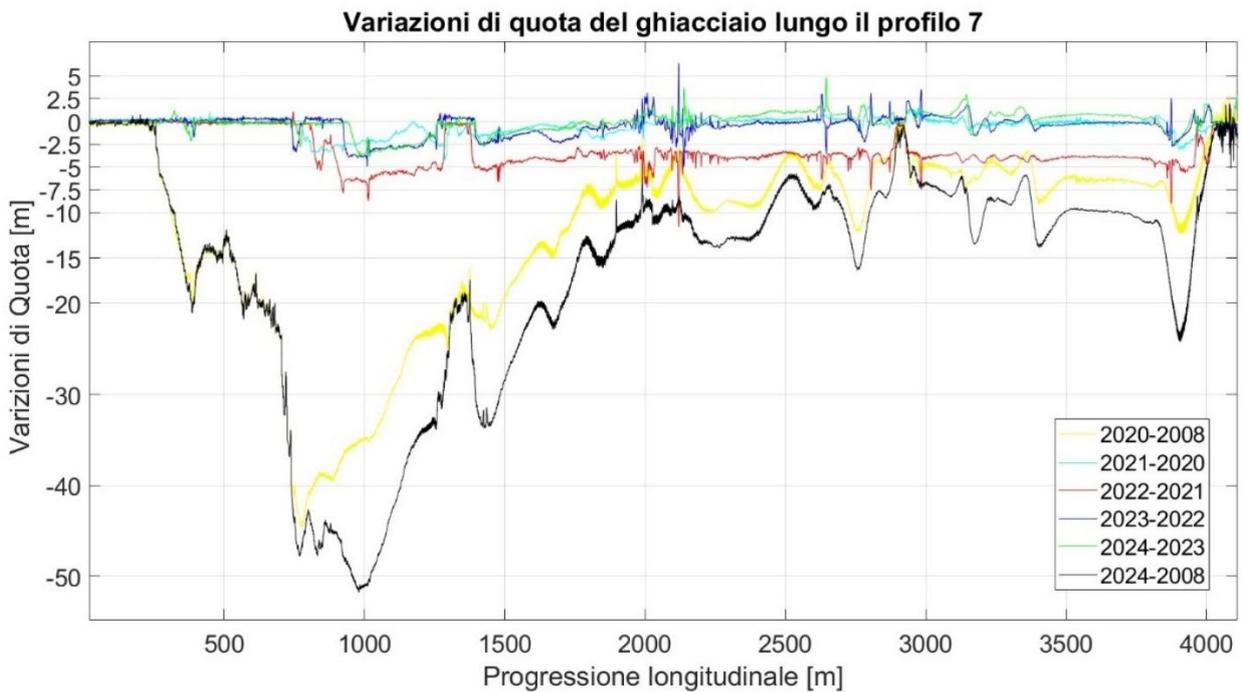


Figura 69: Differenze di quota del Profilo 7, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 7** il processo di ritiro è minore per l'aumento delle pendenze del bedrock. La zona più alta non è influenzata dal Col de Loydon, infatti è molto più riconoscibile il bacino di accumulo anche se rimane comunque caratterizzato da forti pendenze. Nel lasso temporale 2020-2024 l'arretramento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. La linea di

equilibrio è visibile tra i rilievi 2020-2021(3000m s.l.m.) e 2023-2024 (3100m s.l.m.), i profili del 2021-2022 e 2022-2023 non presentano un punto di intersezione. Le variazioni di quota maggiori sono accentuate nell'area del fronte (2022/2021: -5m, 2024/2008: -35m) e diminuiscono con l'aumentare della quota. Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024, pur essendoci stato un processo di accumulo, si è verificato un processo ablativo fortemente accentuato. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

I **profili 8,9,10,11,12,13** descrivono la parte centrale e centro orientale del ghiacciaio. La parte centrale del fronte è caratterizzata dai rilievi orientali che dividono il ghiacciaio dalla zona dei laghi periglaciali insediati nelle morene sottostanti. L'area centrale dei profili è fortemente influenzata dal movimento verso valle dei crepacci, che rendono inefficace la misura delle variazioni di quota in quella parte del ghiacciaio. Inoltre l'area dei crepacci è soggetta a forte acclività. I profili 8,9,10 descrivono bene il ritiro del lobo centrale, a differenza dei profili 11 e 12 soggetti alla presenza dei rilievi prima citati. I profili 8,9,10 e 11 sono i migliori nel rappresentare il bacino di accumulo. Il profilo 13 descrive molto bene il ritiro della lingua orientale del ghiacciaio, anche se nei capitoli successivi, le velocità di ritiro sono state calcolate su specifici profili.

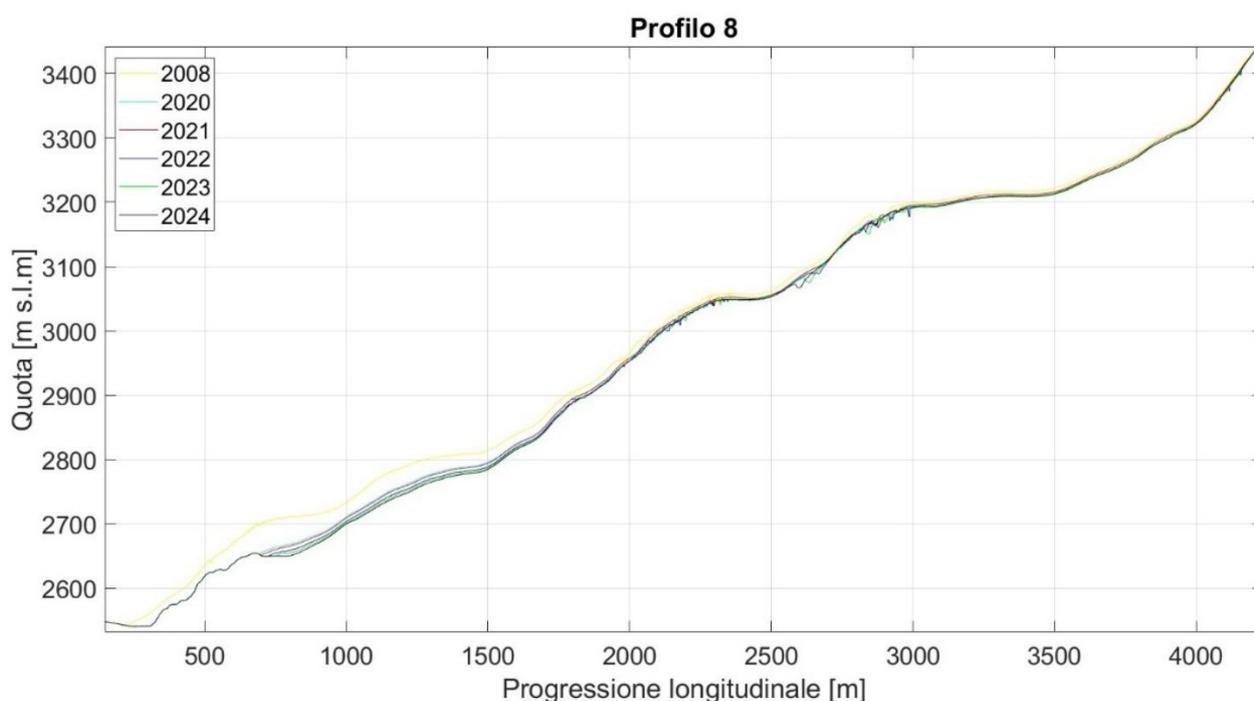


Figura 70: Profilo 8, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

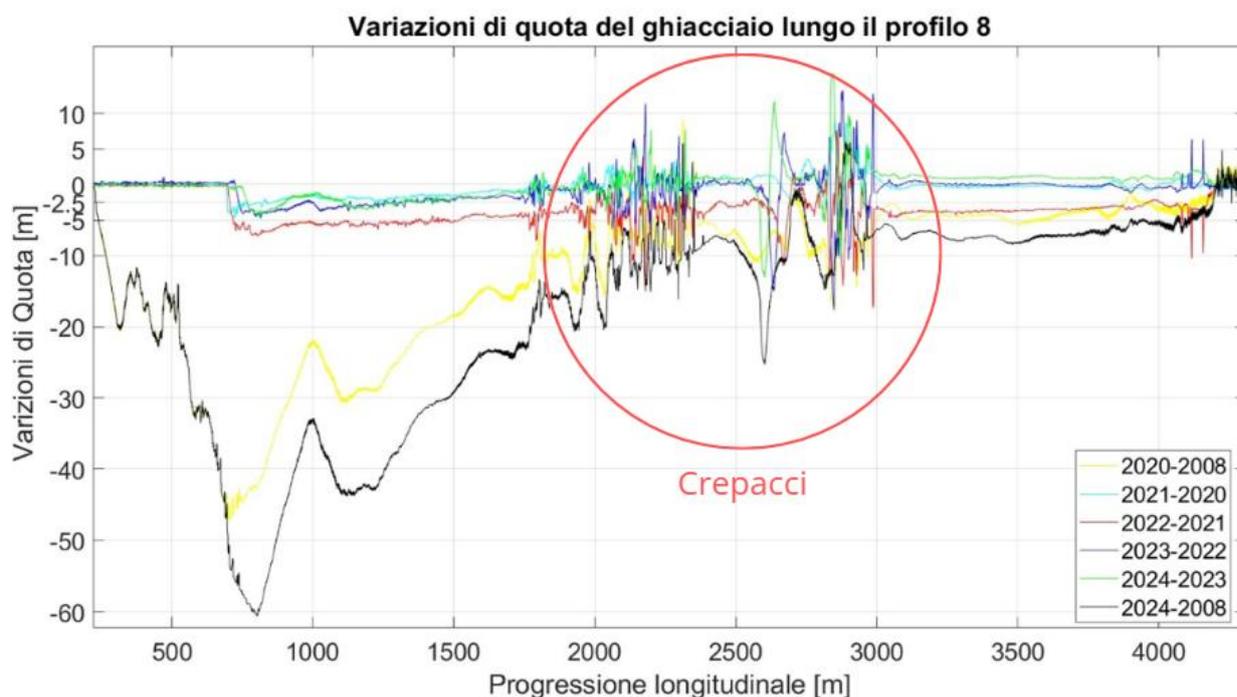


Figura 71: Differenze di quota del Profilo 8, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024. Nella parte centrale sono visibili le fluttuazioni dovute alla presenza dei crepacci.

Nel **profilo 8** è rappresentata l'area centrale del ghiacciaio. Il processo di ritiro è ben riconoscibile e descrittivo del lobo centrale del ghiacciaio. La zona più alta descrive bene il bacino di accumulo e il plateau. Nel lasso temporale 2020-2024 l'arretramento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. La linea di equilibrio è visibile tra i rilievi 2020-2021(2970 m s.l.m.) 2023-2024 (3100 m s.l.m.), i profili del 2021-2022 e 2022-2023 non presentano un punto di intersezione. Le variazioni maggiori di quota sono accentuate nell'area del fronte (2022/2021: -7.5m, 2024/2008: -60m) e diminuiscono con l'aumentare della quota. Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024, pur essendoci stato un processo di accumulo, si è verificato un processo ablativo fortemente accentuato. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

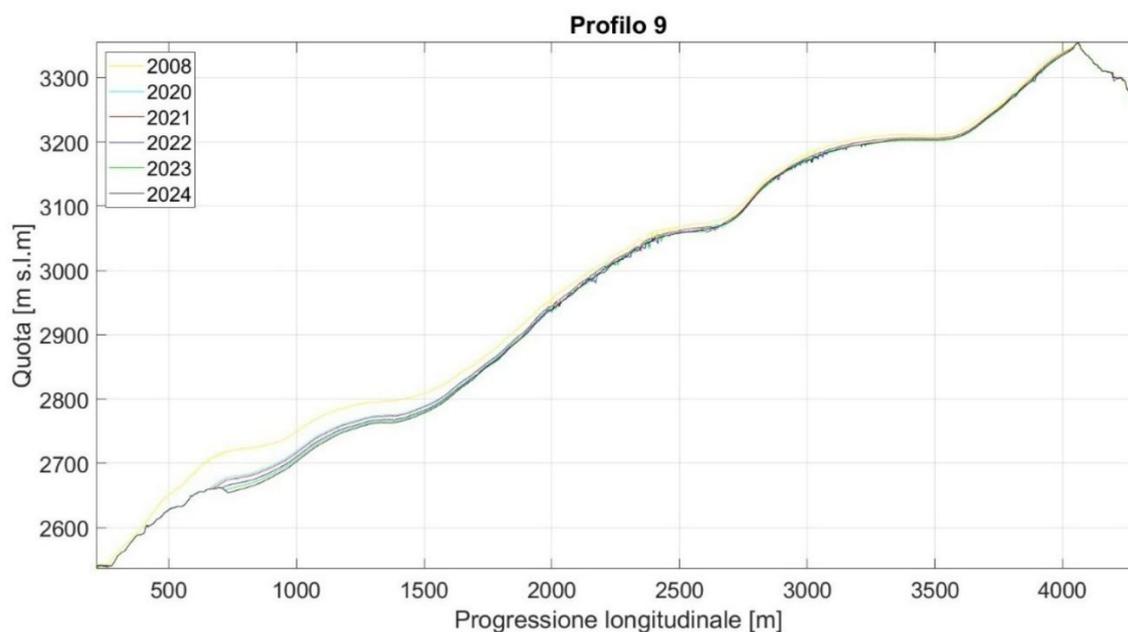


Figura 72: Profilo 9, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

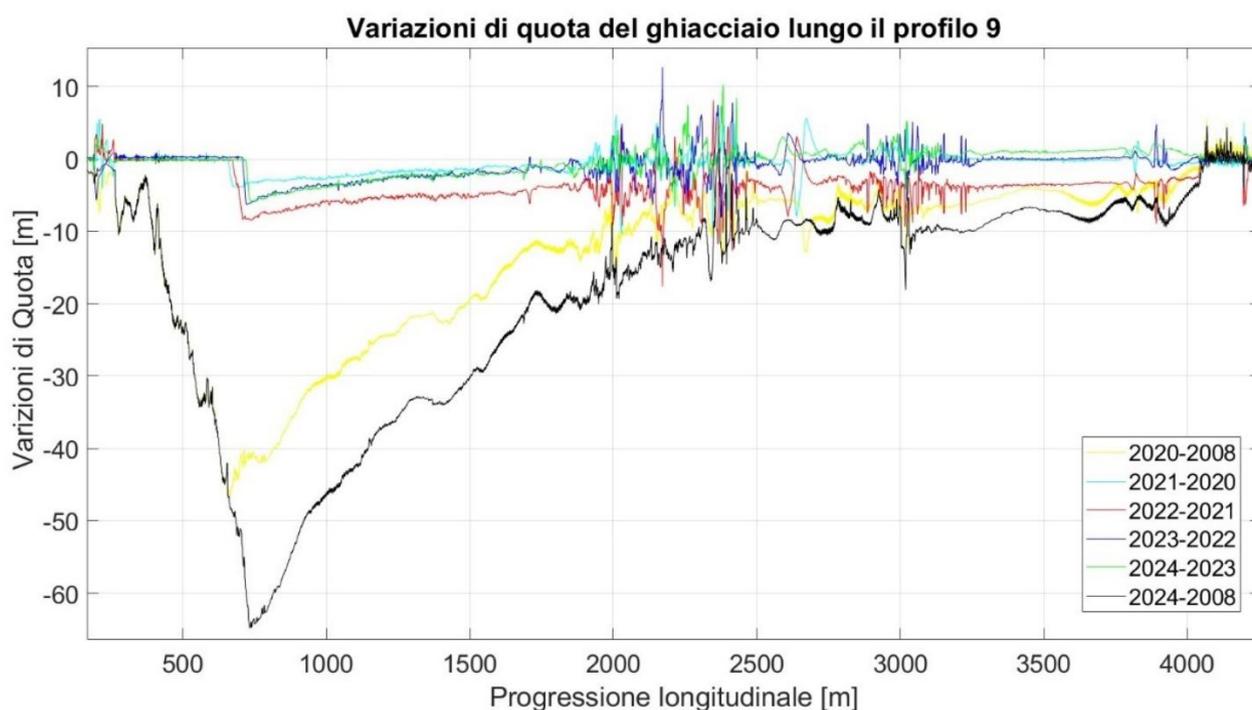


Figura 73: Differenze di quota del Profilo 9, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 9** è ancora rappresentata l'area centrale del ghiacciaio. Il processo di ritiro è ben riconoscibile e descrittivo del lobo centrale. La zona più alta descrive bene il bacino di accumulo. Nel lasso temporale 2020-2024 l'arretramento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. La linea di equilibrio è visibile tra i rilievi del 2020-2021(3050m s.l.m.) e 2023-2024 (3050m s.l.m.), e si manifesta a quote maggiori rispetto ai profili precedenti per le forti

pendenze delle aree dei crepacci. Il confronto tra i profili del 2021-2022 e 2022-2023 non presenta un punto di intersezione. Le variazioni maggiori di quota sono accentuate nell'area del fronte (2022/2021: -8 m, 2024/2008: -64m) e diminuiscono con l'aumentare della quota. Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024 pur essendoci stato un processo di accumulo si è verificato un processo ablativo fortemente accentuato. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

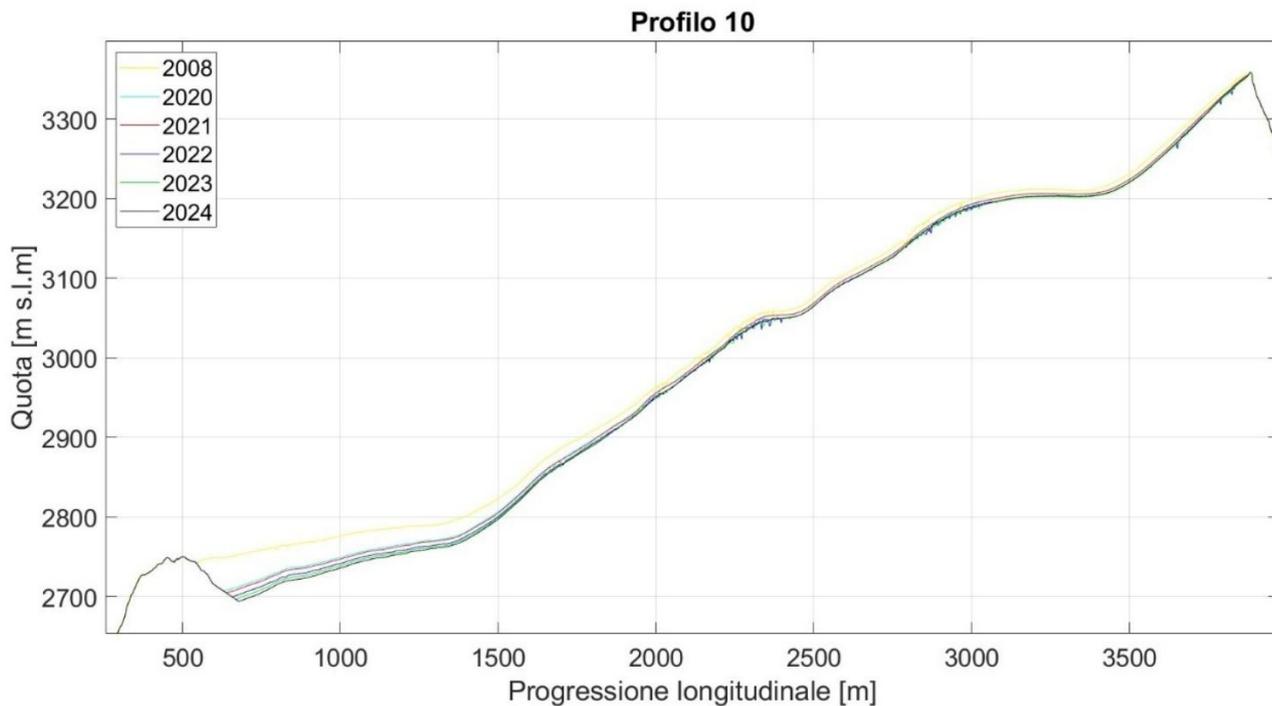


Figura 74: Profilo 10, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

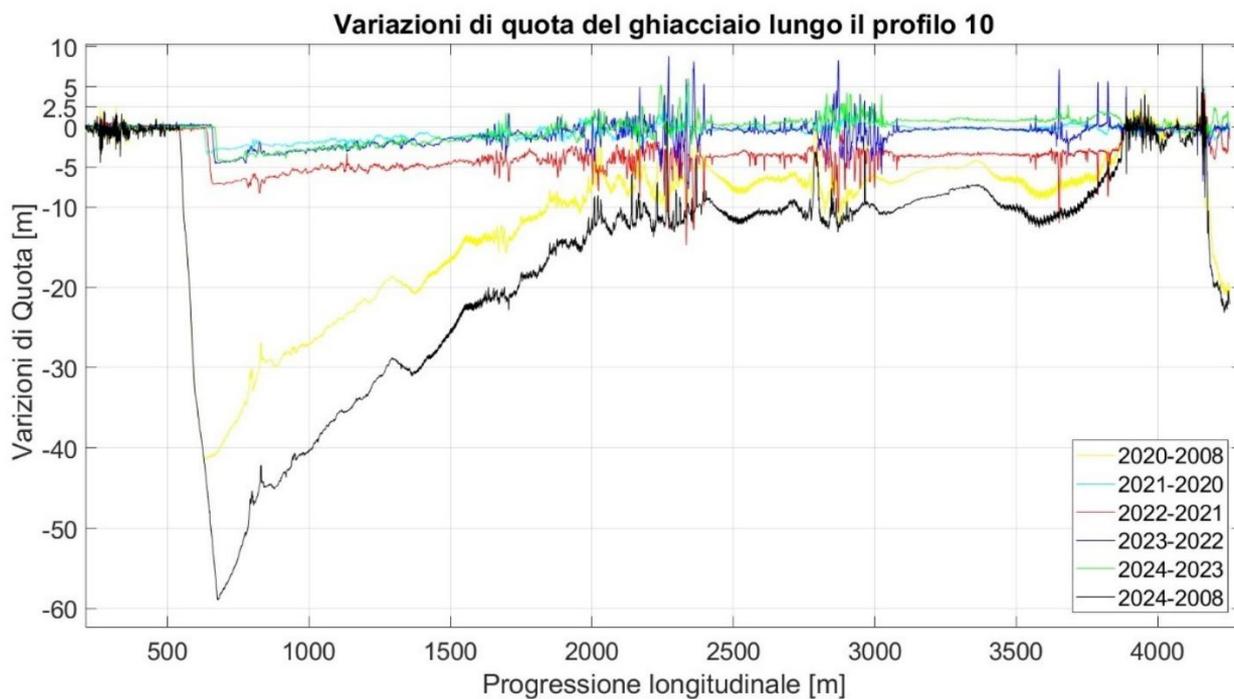


Figura 75: Differenze di quota del Profilo 10, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 10** è rappresentata l'area centro orientale del ghiacciaio. Il processo di ritiro non è ben riconoscibile per la presenza del rilievo perimetrale al fronte. La zona più alta descrive bene il bacino di accumulo. Nel lasso temporale 2020-2024 l'arretramento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. La linea di equilibrio è visibile tra i rilievi 2020-

2021(3050m s.l.m.) 2023-2024 (3050m s.l.m.) a quote maggiori rispetto ai profili 7 e 8. Questo è dovuto alle forti pendenze delle aree dei crepacci; il confronto tra i profili del 2021-2022 e 2022-2023 non presenta un punto di intersezione. Le variazioni maggiori di quota sono accentuate nell'area del fronte (2022/2021: -7 m, 2024/2008: -59m) e diminuiscono con l'aumentare della quota. Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024 pur essendoci stato un processo di accumulo si è verificato un processo ablativo fortemente accentuato. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

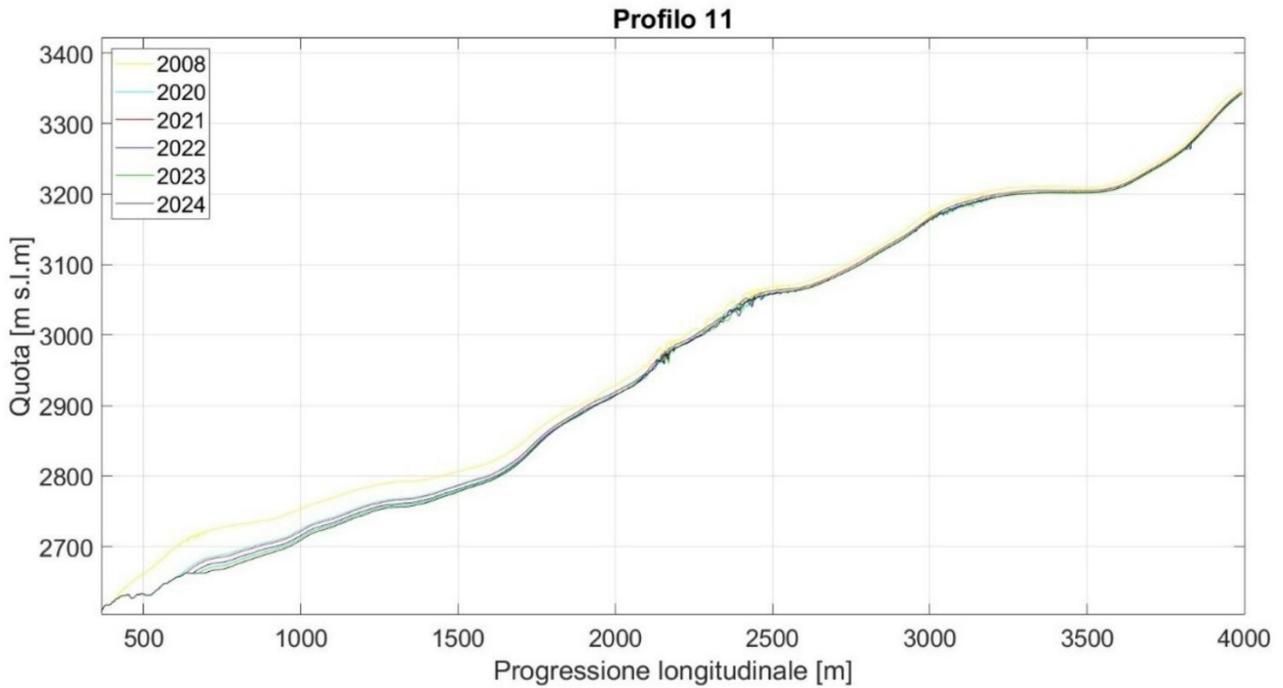


Figura 76: Profilo 11, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

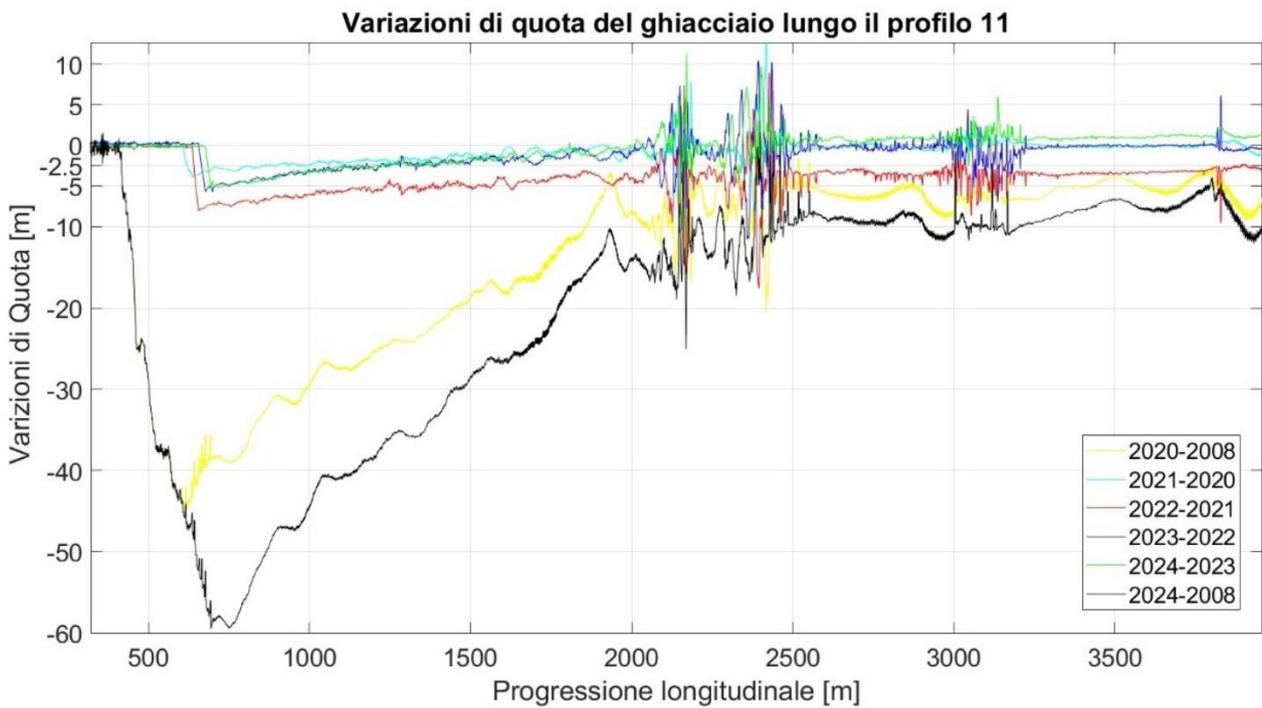


Figura 77: Differenze di quota del Profilo 11, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 11** è rappresentata ancora l'area centrale del ghiacciaio. Il processo di ritiro è ben riconoscibile e descrittivo del lobo centrale. La zona più alta descrive bene il bacino di accumulo. Nel lasso temporale 2020-2024 l'arretramento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. La linea di equilibrio è visibile tra i rilievi 2020-2021(2950 m s.l.m.) 2023-2024

(2750m s.l.m.) 2022-2023 (2950m s.l.m.) a quote maggiori rispetto ai profili precedenti per le forti pendenze delle aree dei crepacci; il confronto tra i rilievi del 2021-2022 non presenta un punto di intersezione. Le variazioni maggiori di quota sono accentuate nell'area del fronte (2022/2021: -8 m, 2024/2008: -59 m) e diminuiscono con l'aumentare della quota. Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024 pur essendoci stato un processo di accumulo si è verificato un processo ablativo fortemente accentuato. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

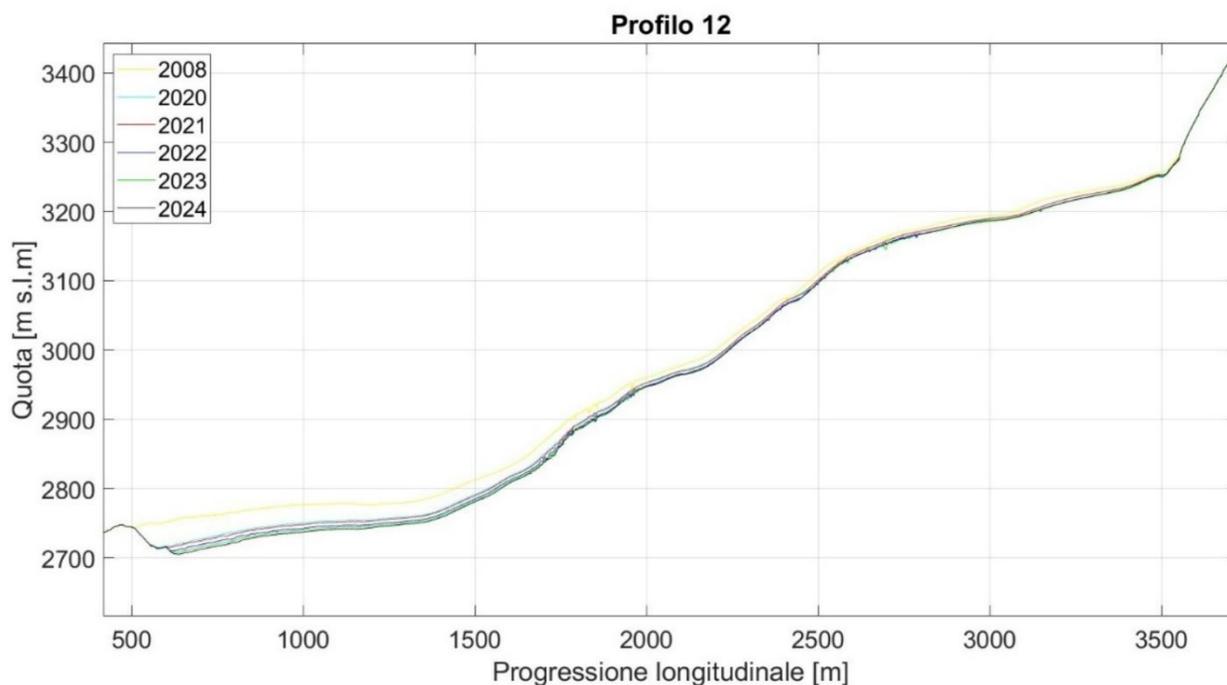


Figura 78: Profilo 12, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

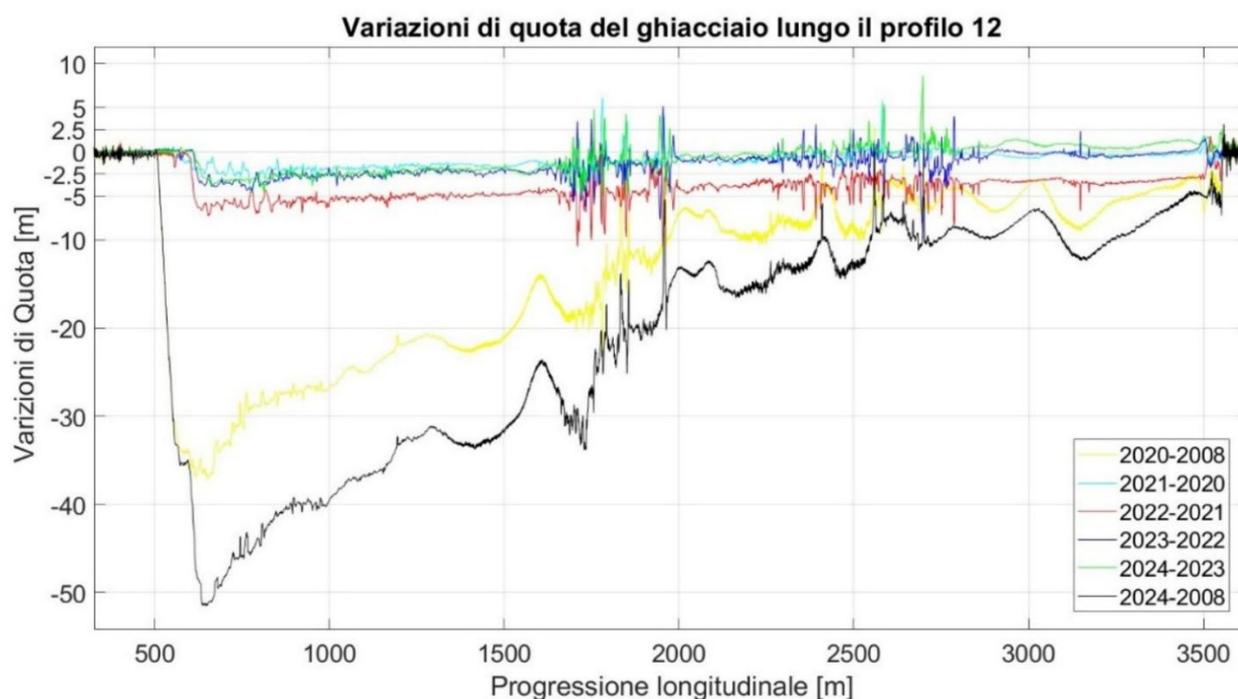


Figura 79: Differenze di quota del Profilo 12, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 12** è rappresentata l'area orientale del ghiacciaio. Il processo di ritiro non è più ben riconoscibile per la presenza del rilievo perimetrale al fronte. La zona più alta descrive bene il bacino di accumulo. Nel lasso temporale 2020-2024 l'arretramento più accentuato si è verificato

tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. La linea di equilibrio è visibile tra i rilievi 2020-2021(2950 m s.l.m.) e 2023-2024 (2750 m s.l.m.) a quote maggiori rispetto ai profili dell'area centrale e centro occidentale. Ciò è dovuto alle forti pendenze delle aree dei crepacci. Il confronto tra i profili del 2021-2022 e 2022-2023 non presenta un punto di intersezione. Le variazioni maggiori di quota sono accentuate nell'area del fronte (2022/2021: -7 m, 2024/2008: -52m) e diminuiscono con l'aumentare della quota. Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024, pur essendoci stato un processo di accumulo, si è verificato un processo ablativo fortemente accentuato. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

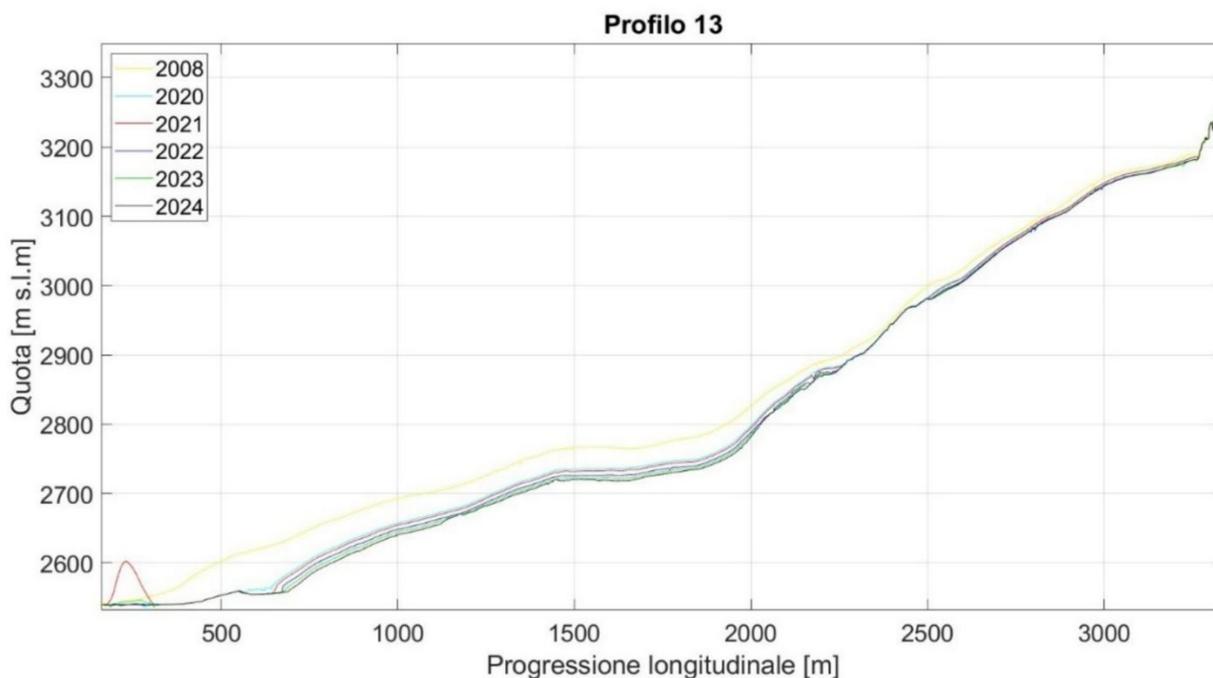


Figura 80: Profilo 13, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

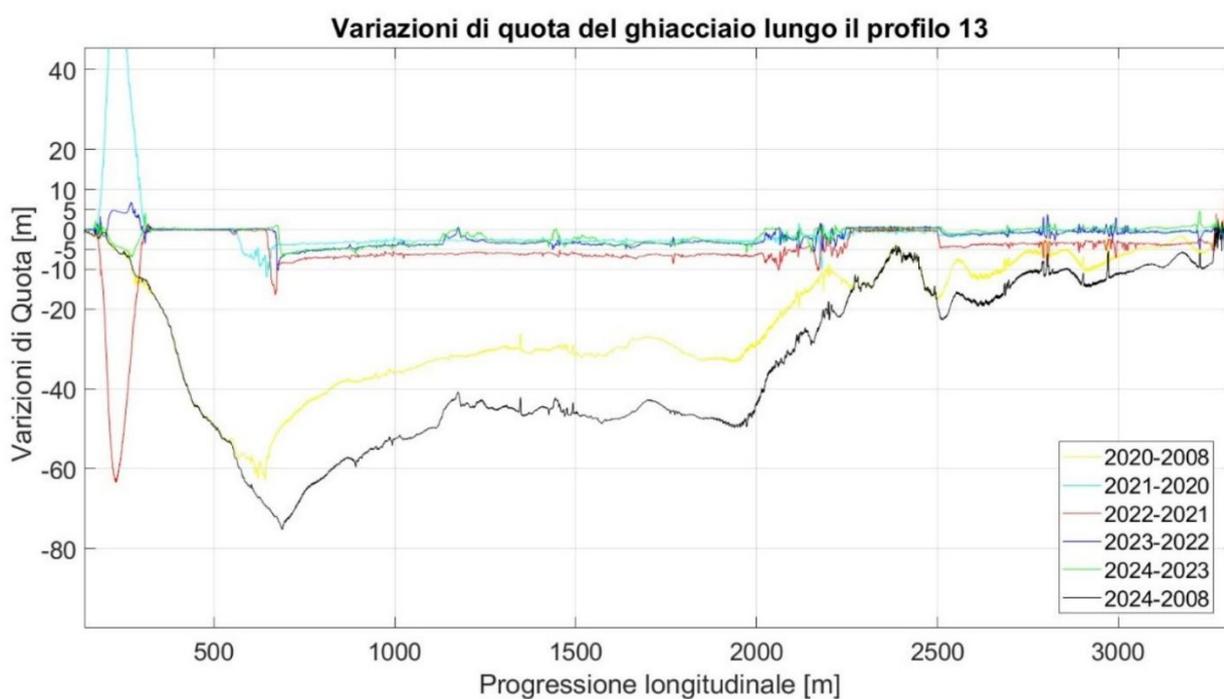


Figura 81: Differenze di quota del Profilo 13, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 13** il processo di ritiro è ben riconoscibile e descrittivo della lingua orientale del ghiacciaio e le forti fluttuazioni sono dovute alla presenza del lago periglaciale non ben descritto dal processo fotogrammetrico. La regione più alta descrive abbastanza bene il bacino di accumulo, ma meno in confronto ai profili precedenti. Nel lasso temporale 2020-2024 l'arretramento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. La linea di equilibrio è visibile

tra i rilievi 2020-2021(3050 m s.l.m.) 2023-2024 (3050 m s.l.m.), a quote maggiori rispetto ai profili precedenti per le forti pendenze delle aree dei crepacci; il confronto tra i profili del 2021-2022 e 2022-2023 non presenta un punto di intersezione. Le variazioni maggiori di quota sono accentuate nell'area del fronte (2022/2021: -8 m, 2024/2008: -59m) e diminuiscono con l'aumentare della quota. Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024, pur essendoci stato un processo di accumulo, si è verificato un processo ablativo fortemente accentuato. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

I **profili 14,15,16,17,18** rappresentano le sezioni perpendicolari alla direzione di valle, e si concentrano sul bacino di ablazione e sull'area centrale dei crepacci. Rispetto ai profili precedenti, che rappresentano sezioni con forti variabilità di quota lungo il profilo longitudinale, questi profili riescono ad apprezzare meglio le variazioni tra i diversi anni e la morfologia della valle glaciale. Come constatato dai profili precedenti, le differenze in altezza diminuiscono all'aumentare della quota del profilo e le conclusioni sulle variabilità annuali sono simili a quelle derivate dall'osservazione precedenti.

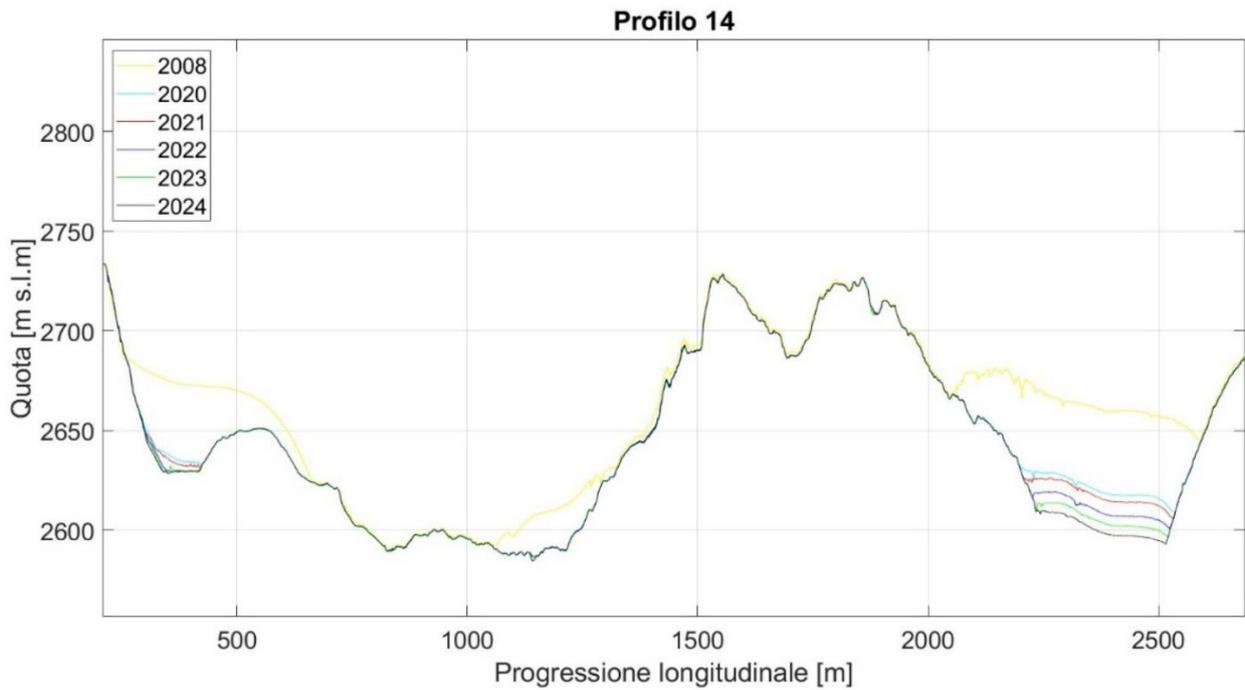


Figura 82: Profilo 14, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

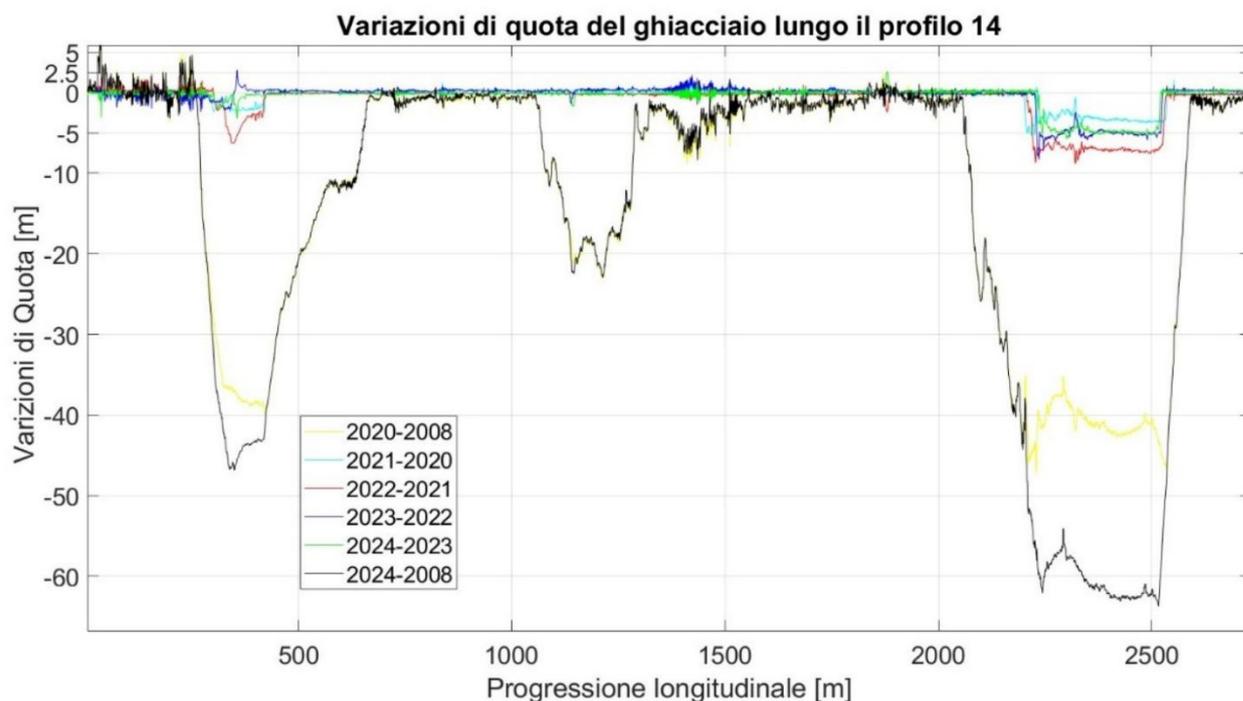


Figura 83: Differenze di quota del Profilo 14, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 14** è rappresentata l'area del fronte del ghiacciaio. La parte sinistra rappresenta la lingua orientale, quella destra la lingua occidentale. Nel lasso temporale 2020-2024 l'abbassamento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. Le variazioni maggiori di quota sono nell'area occidentale (2022/2021: -8 m, 2024/2008: -62m). Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024 processo ablativo è molto simile all'anno precedente 2022-2023. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

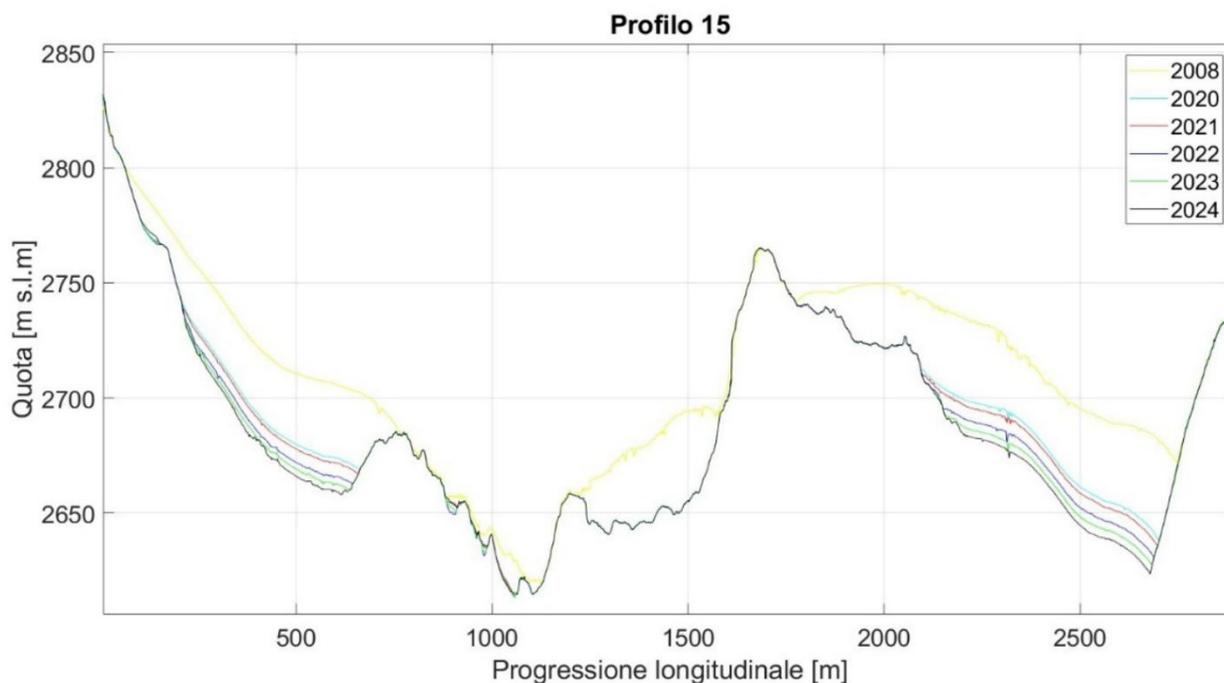


Figura 84: Profilo 15, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

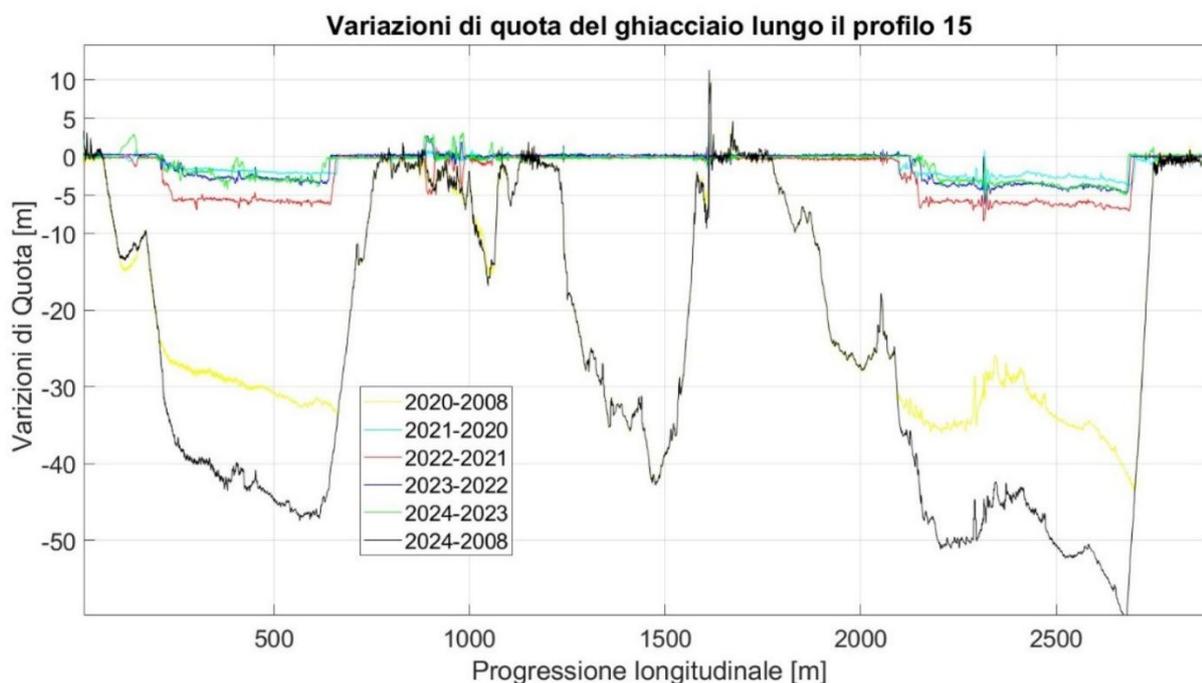


Figura 85: Differenze di quota del Profilo 15, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 15** è ancora rappresentata l'area del fronte del ghiacciaio. La parte sinistra rappresenta la lingua orientale, quella centrale il lobo che si sviluppa tra i due rilievi sul fronte e quella destra la lingua occidentale. Nel lasso temporale 2020-2024 l'abbassamento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. Le variazioni maggiori di quota sono ancora nell'area occidentale (2022/2021: -8 m, 2024/2008: -60m). Inoltre si nota che tra il 2023 e 2024 processo

ablativo è molto simile all'anno precedente 2022-2023. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

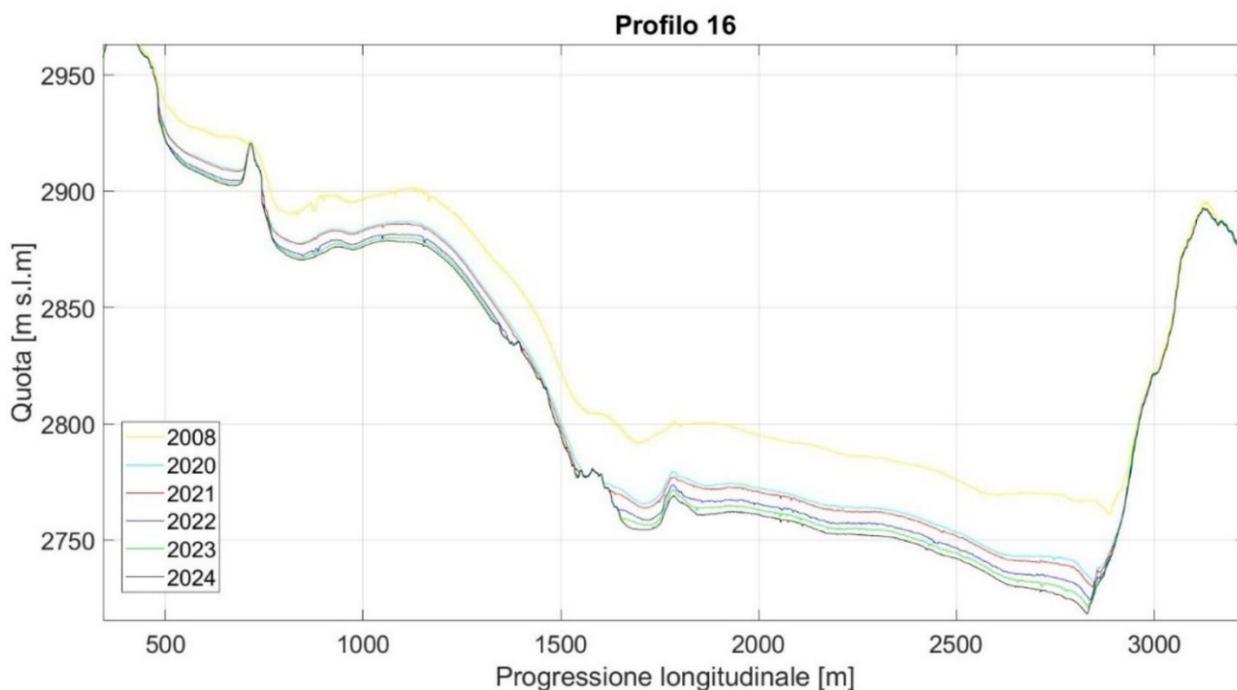


Figura 86: Profilo 16, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

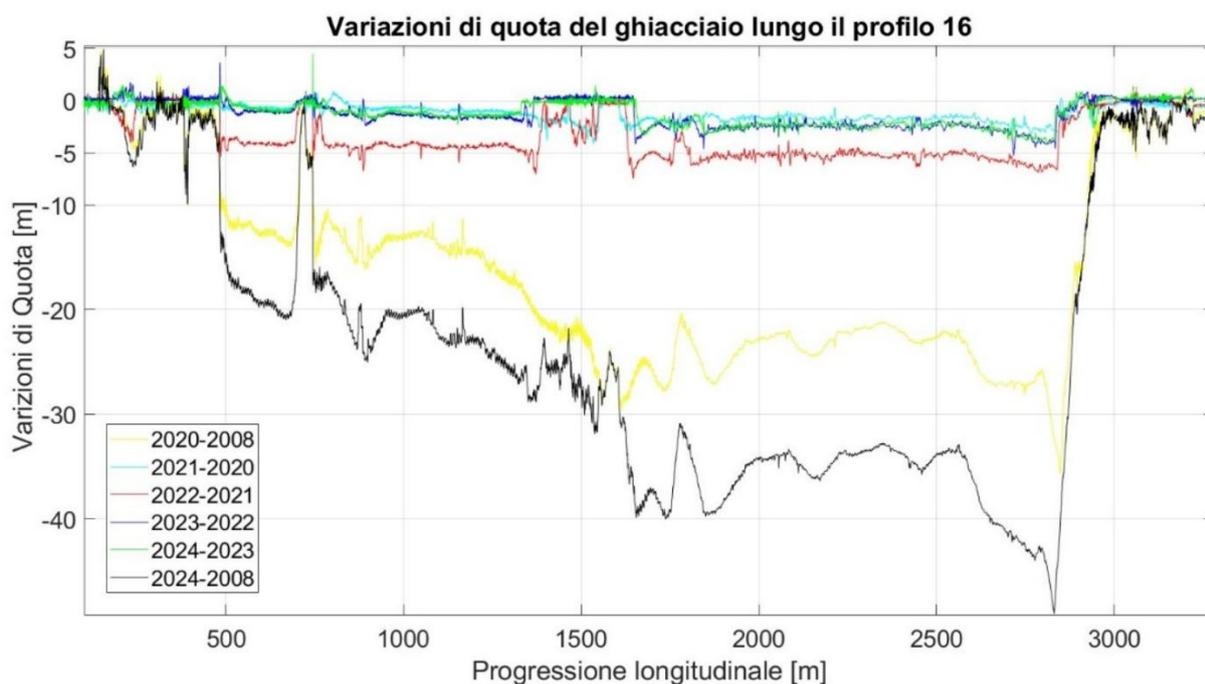


Figura 87: Differenze di quota del Profilo 16, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 16** è rappresentata l'area centrale del bacino di ablazione. La parte sinistra rappresenta l'area occidentale del ghiacciaio, quella destra l'area orientale, quella centrale un affioramento del bed-rock ben visibile dalle ortofoto del 2022, 2023 e 2024. Nel lasso temporale 2020-2024 l'abbassamento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021. Le variazioni di quota maggiori sono nell'area orientale (2022/2021: -7 m, 2024/2008: -50m). Inoltre si nota che

tra il 2023 e il 2024, il processo ablativo è molto simile all'anno precedente 2022-2023. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

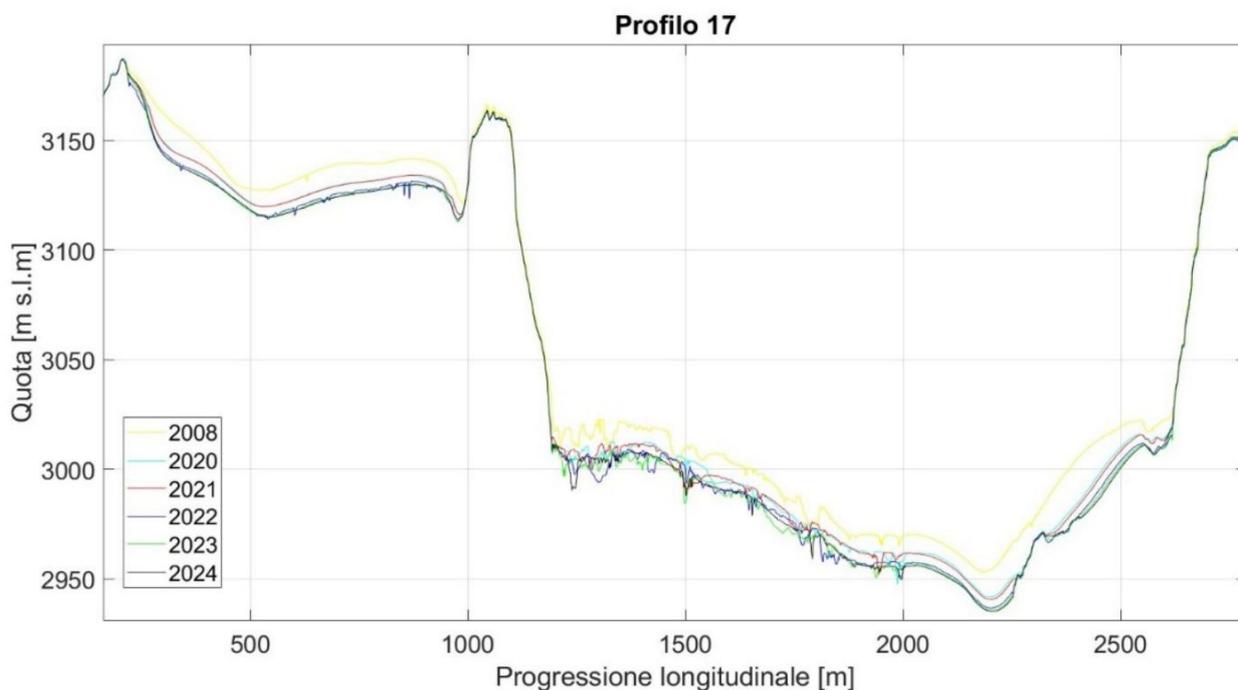


Figura 88: Profilo 17, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

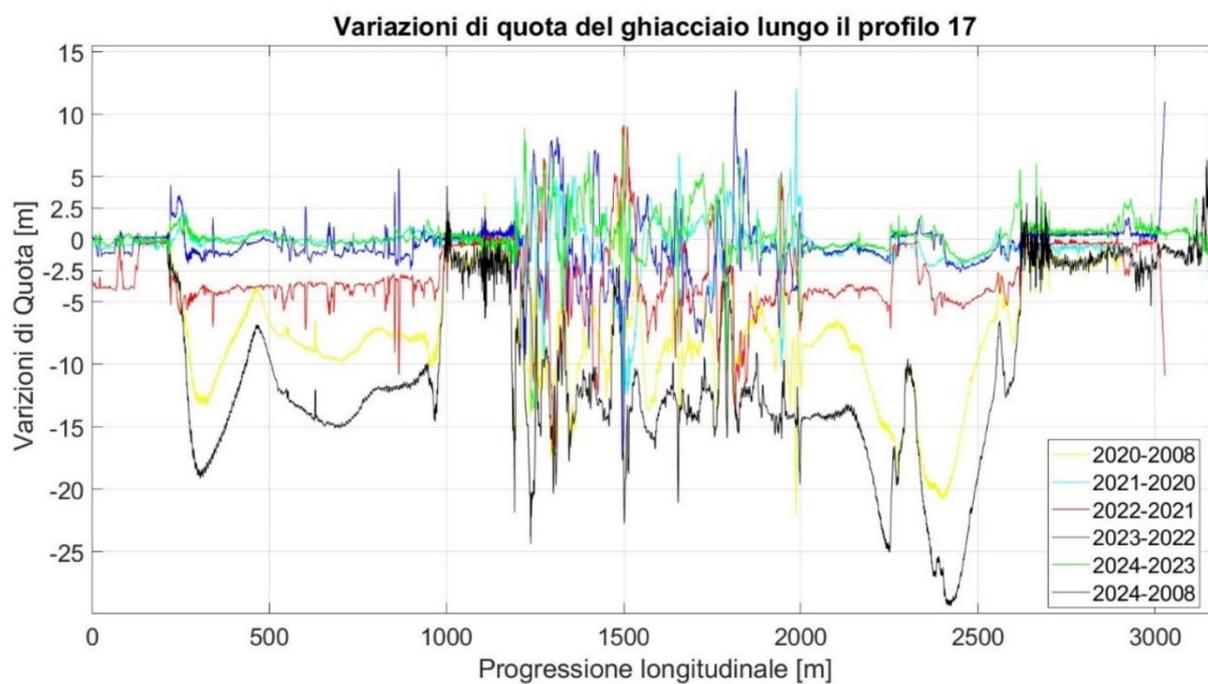


Figura 89: Differenze di quota del Profilo 17, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 17** è rappresentata l'area in cui sono presenti i crepacci, causa delle forti fluttuazioni nelle parti centrali dei grafici. La parte sinistra è l'area occidentale del ghiacciaio, quella destra l'area orientale e quella centrale i crepacci in continuo movimento con il rilievo "Vedette". Nel lasso temporale 2020-2024 l'abbassamento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e

quello del 2021 e confrontato con le differenze tra 2008-2024 e 2008-2020 si apprezza quanto quell'annata abbia inficiato sull'abbassamento del ghiacciaio. Le variazioni maggiori di quota sono nell'area orientale (2022/2021: -5 m, 2024/2008: -30m), ma a differenza dei profili precedenti non c'è una grande differenza con l'area occidentale. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e quello del 2021 presenta la minore riduzione.

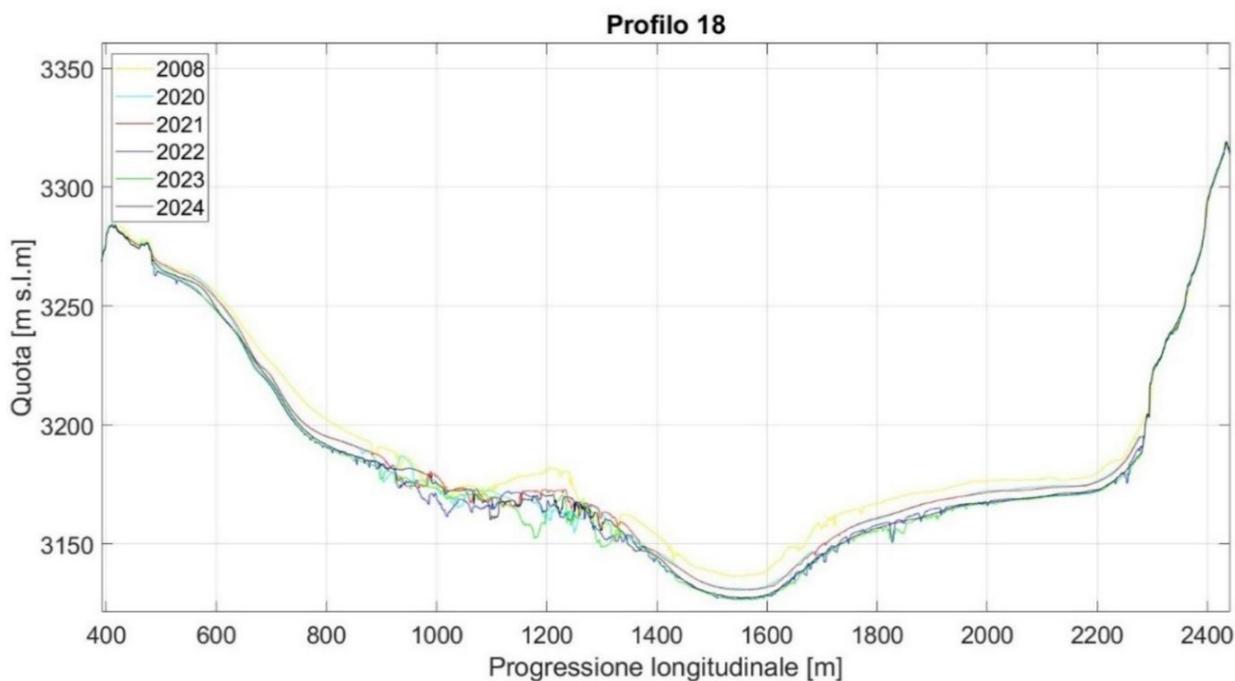


Figura 90: Profilo 18, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

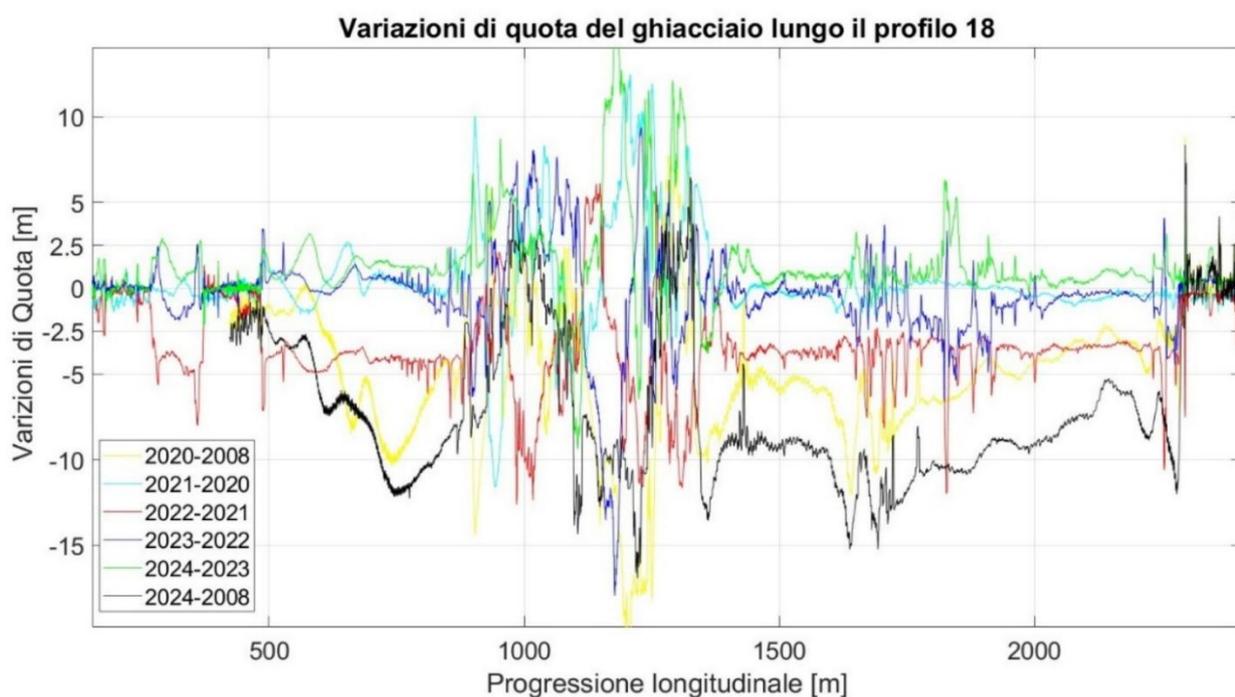


Figura 91: Differenze di quota del Profilo 18, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 18** è ancora rappresentata l'area in cui sono presenti i crepacci. La parte sinistra è l'area occidentale del ghiacciaio, quella destra l'area orientale. Nel lasso temporale 2020-2024 l'abbassamento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021 e confrontato con le differenze tra 2008-2024 e 2008-2020 si apprezza quanto quell'annata abbia inficiato sull'abbassamento del ghiacciaio. Le variazioni sono omogenee su tutto il profilo (2022/2021: -4

m, 2024/2008: -12m). Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e l'anno 2023 presenta accumulo.

I **profili 19,20** rappresentano le sezioni perpendicolari alla direzione di valle e si concentrano sul bacino di accumulo a quote maggiori dei 3100m. Rispetto ai profili paralleli all'asse vallivo precedenti, queste sezioni riescono ad apprezzare meglio la variazioni positive tra i diversi anni.

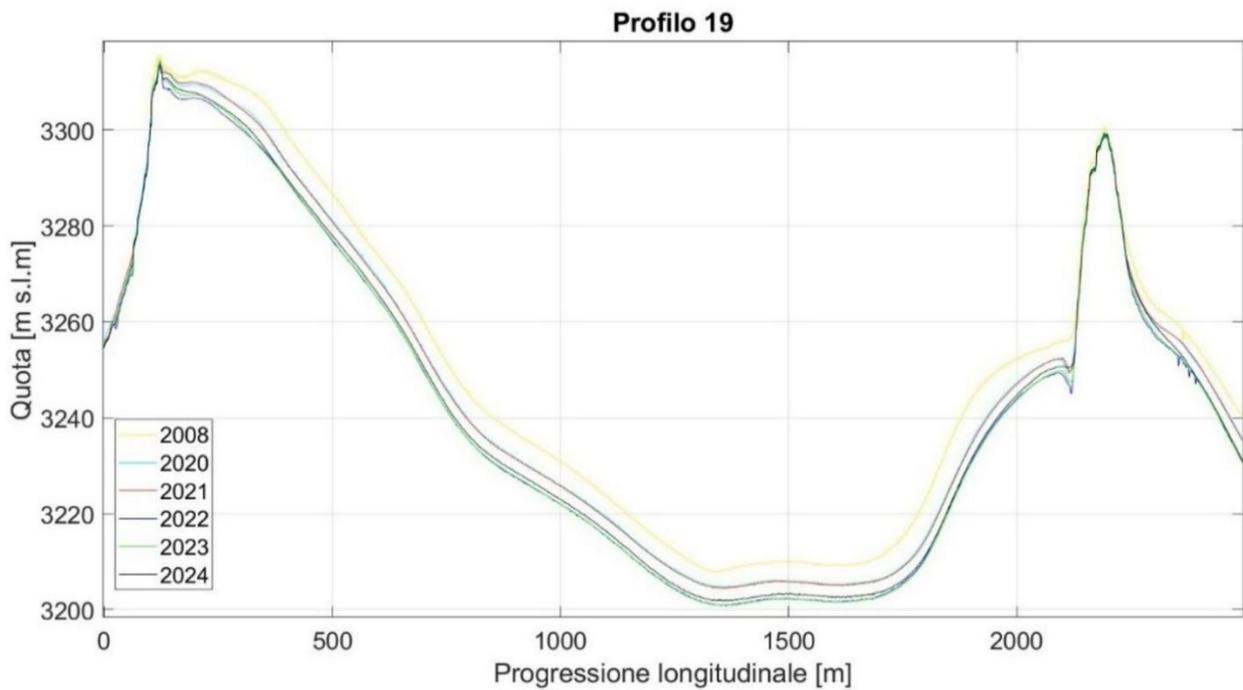


Figura 92: Profilo 19, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

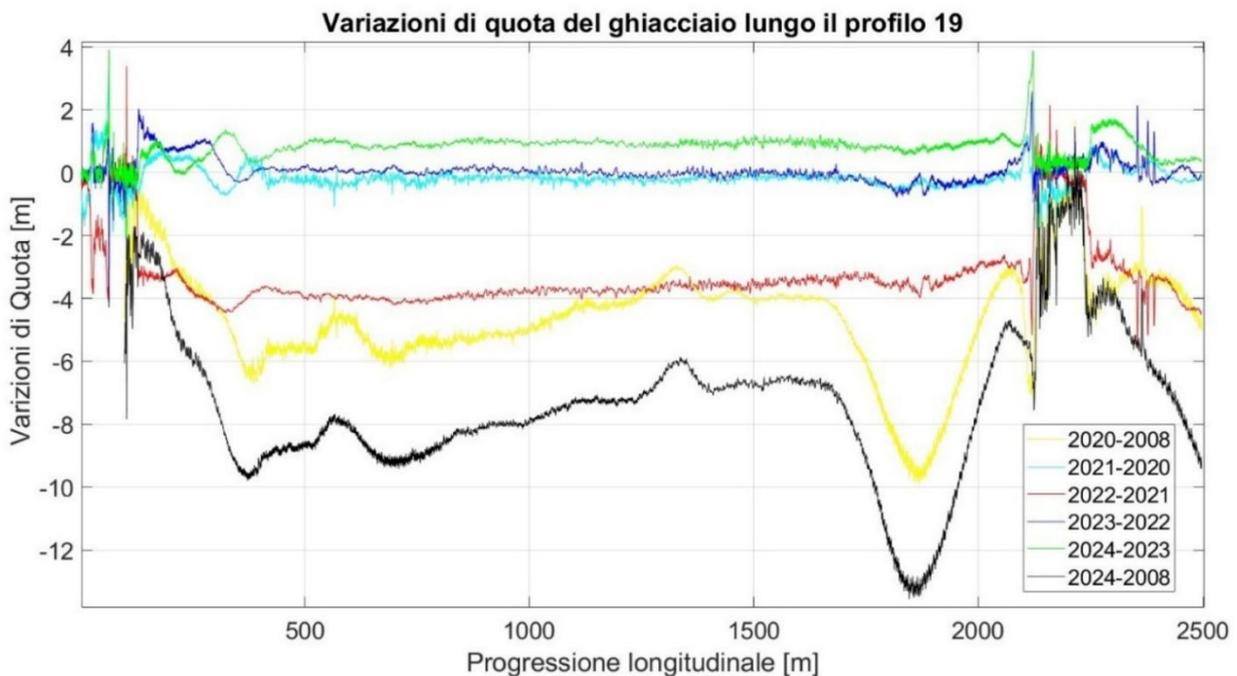


Figura 93: Differenze di quota del Profilo 19, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 19** è ben rappresentato il bacino di accumulo, la parte sinistra rappresenta l'area occidentale del ghiacciaio, quella destra l'area orientale. Nel lasso temporale 2020-2024 l'abbassamento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021 e confrontato con le differenze tra 2008-2024 e 2008-2020 si apprezza quanto quell'annata abbia inficiato sulla riduzione del ghiacciaio. Le variazioni sono abbastanza omogenee su quasi tutto il profilo (2022/2021: -5 m, 2024/2008: -13m), tranne per il versante esposto ad est dove sono visibili le maggiori differenze. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e l'anno 2023 presenta accumulo di circa 0.75 m. Le annate 2020/2021 e 2022/2023 non presentano variazioni significative.

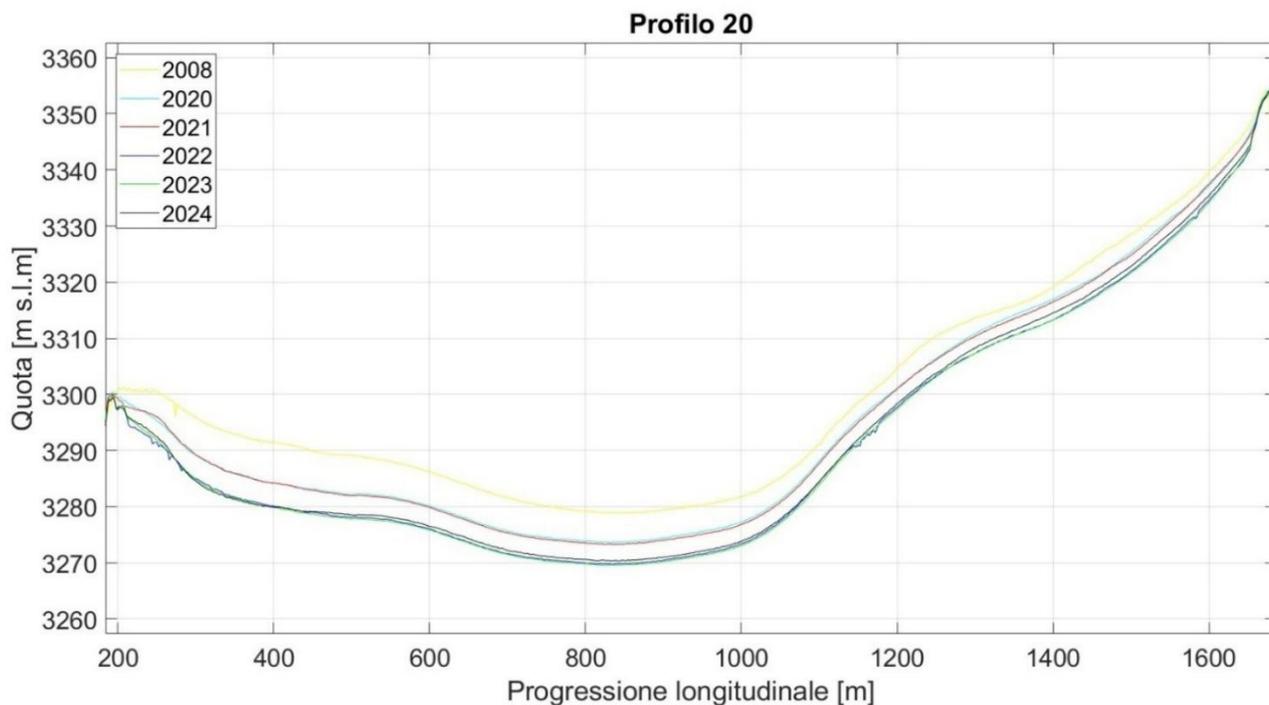


Figura 94: Profilo 20, rappresentati i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

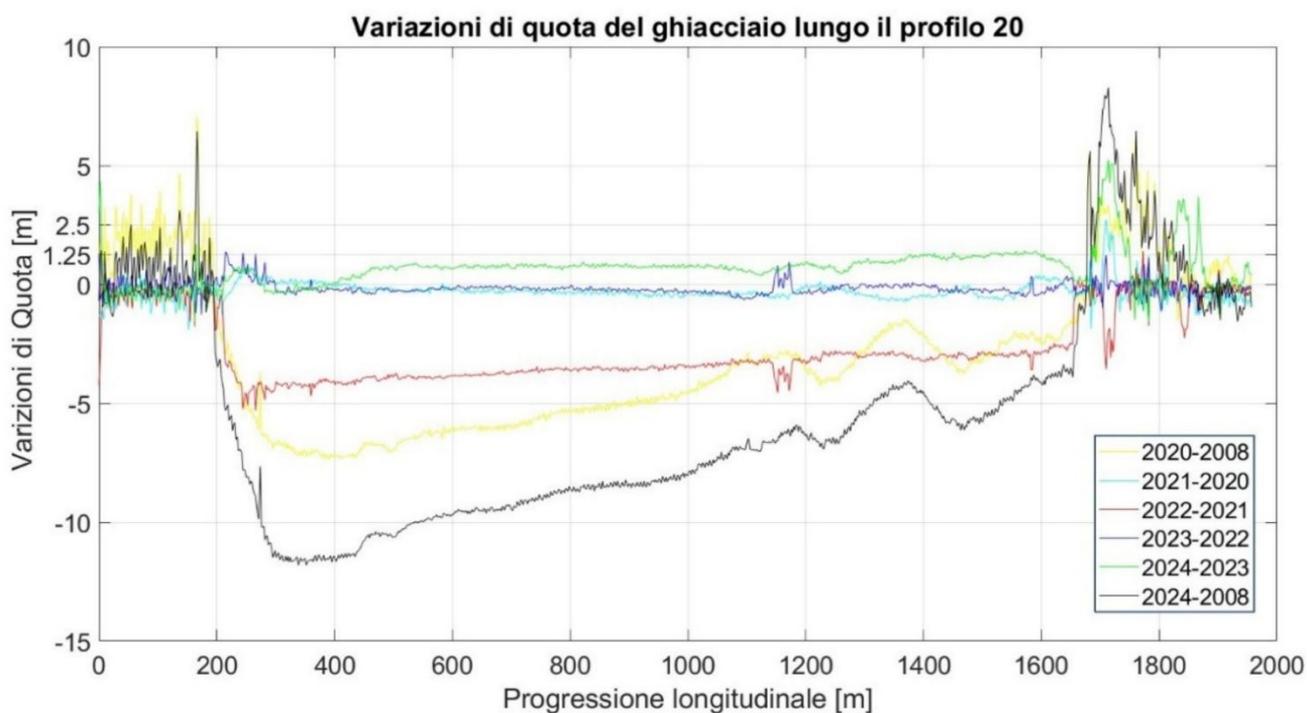


Figura 95: Differenze di quota del Profilo 20, tra i rilievi 2008-2020-2021-2022-2023-2024

Nel **profilo 20** è rappresentata la parte più alta del bacino di accumulo, la parte sinistra è l'area occidentale del ghiacciaio, quella destra l'area orientale. Nel lasso temporale 2020-2024 l'abbassamento più accentuato si è verificato tra il rilievo del 2022 e quello del 2021 e confrontato con le differenze tra 2008-2024 e 2008-2020 si apprezza quanto quell'annata abbia inficiato sulla

riduzione del ghiacciaio. Le variazioni sono abbastanza omogenee su tutto il profilo (2022/2021: -5 m, 2024/2008: -13m), tranne nella differenza tra 2024-2008 che evidenzia un maggior abbassamento nell'area occidentale. Il rilievo del 2022 rappresenta l'annata peggiore e l'anno 2023 presenta accumulo di circa 1 m. Le annate 2020/2021 e 2022/2023 non presentano variazioni significative.

5.2.3. Script 1: Analisi dei profili estratti da DSM e DoD

Per l'estrapolazione dei profili si è utilizzato il software QGIS, che ha permesso un tracciamento basato sulla foto-interpretazione delle varie ortofoto dei prodotti cartografici Digisky, con la finalità di ottenere un dato efficace per un'analisi qualitativa del ghiacciaio. I profili sono stati scaricati sfruttando la risoluzione massima del DSM, la visualizzazione finale e il calcolo è stato svolto mediante uno script sul software Matlab. La prima parte dello script 1 ha la funzione di caricamento dati da un file.xls scaricato da QGIS. Successivamente, essendo stato utilizzato anche il dato di Regione Valle d'Aosta risalente al 2008 e con diversa risoluzione spaziale, si è svolto un processo interpolativo di ricampionamento rendendolo della stessa dimensione dei dati Digisky. Il risultato ha permesso che non ci fosse una minore risoluzione spaziale nel calcolo della differenza tra profili. L'algoritmo si conclude con la differenza tra i profili, visualizzazione e salvataggio automatico dei grafici.

5.2.4. Conclusioni

Il tracciamento di profili e sezioni permette di avere una comprensione delle variazioni altimetriche sullo specifico profilo. Data la grandezza dell'area in analisi è importante tener conto della necessità di analizzare un prodotto cartografico che rappresenti arealmente il ghiacciaio, come un DoD (Difference of DSMs), per essere sicuri che rispecchi il comportamento di tutta la massa glaciale e di avere così un dato non solo qualitativo ma quantitativo del comportamento generale. Allo stesso tempo risulta più comodo per notare comportamenti peculiari del ghiacciaio rispetto alla visualizzazione 2D del DSM e delle variazioni tra DSM (DoD). In conclusione l'annata 2021/2022 si è rivelata la peggiore, l'annata 2023/2024 presenta un processo di accumulo e l'annata 2022/2023 presenta un'area di accumulo molto ristretta. Inoltre non è detto che un maggior accumulo rispecchi una minore diminuzione, come ha dimostrato il rilievo del 2024. È inoltre evidente un comportamento spesso eterogeneo tra l'area orientale e occidentale, sia nella

zona del fronte che nel bacino di accumulo. Sono visibili anche gli errori compiuti dal processo fotogrammetrico nella rappresentazione della superficie dei laghi.

Dai profili è chiaro che la linea di equilibrio abbia una forte variabilità, si distribuisce solitamente leggermente sopra i 3000 m s.l.m. a meno che l'area non sia soggetta ad una forte pendenza, ma il vero accumulo si sviluppa a quote superiori i 3000 m s.l.m. e nelle condizioni meno acclivi. Un'analisi più dettagliata della posizione e quota delle linee di equilibrio è trattata nel capitolo 4.8.

È importante affermare con cautela che il ghiacciaio ha sviluppato processi di accumulo, che se pur positivi, non compensano il processo ablativo di cui è soggetto a valle della linea di equilibrio. Inoltre c'è da considerare che l'accumulo evidenziato è un deposito di neve che probabilmente non avrà il tempo di trasformarsi in ghiaccio.

5.3. Teoria statistica e trattamento delle misure topografiche

5.3.1. Introduzione

I principi e formule trattate nel seguente capitolo sono estratte dai testi “Trattamento di misure topografiche” del professor Alberto Cina e “Quaderni di topografia vol.1, Geodesia, cartografia e trattamento delle misure” del professor Ambrogio Maria Manzino.

5.3.2. Variabile statistica, Variabile casuale, Funzione di densità di probabilità

Chiamiamo “**variabile statistica**” una grandezza che può assumere una serie o più serie (per variabili multidimensionali) di “**valori argomentali**” x_i rappresentati un **attributo** o più attributi associati ad una **numerosità** F_i di individui. Una **variabile statistica** è una grandezza che può assumere uno o più “**valori argomentali**” x_i (nel caso di variabili multidimensionali), i quali rappresentano un **attributo** associato a un insieme di individui. A ciascun valore x_i della variabile è associata una **numerosità** F_i di individui, che indica il numero di individui che presentano quell’attributo.

L’**individuo** è il soggetto dell’indagine statistica caratterizzato da un attributo in analisi, il **campione** sono l’insieme degli n individui indagati e la **popolazione** è l’insieme di tutti gli individui indagabili di cui almeno uno assume un valore di attributo differente. La **numerosità** F_i , detta **frequenza assoluta** può essere rappresentata come **frequenza relativa** $f_i = F_i/N$ dove $N = \sum_{i=1}^{max} F_i$ e di cui $\sum_{i=1}^{max} f_i = 1$. Si definisce “**variabile statistica**”, nel caso in cui il censimento è su una popolazione ben specifica, e per “**variabile casuale**” una quantità variabile X rappresentabile da più valori argomentali x_i , estratti casualmente dai possibili valori della popolazione e con probabilità p_i , di cui $\sum_{i=1}^n p_i = 1$. La variabile casuale ha la funzione di prevedere come si distribuiscono un gran numero di risultati all’interno di una popolazione, ed a differenza della variabile statistica è descritta non da frequenze ma da probabilità continue o discrete note a priori.

Per cui per ogni variabile casuale discreta X , note le x_i e le rispettive p_i , si può definire una **funzione di distribuzione**: $F(x_i) = p(x \leq x_i) = \sum_{j=1}^i p_j$, $i = 1 \dots n$, con un comportamento a gradini. Una variabile casuale è detta continua se la distribuzione $F(x)$ esiste ed è continua

nell'intervallo $[-\infty, +\infty]$ ed ovunque positiva. La funzione $f(x)$ è chiamata “**densità di probabilità**”:

$$F(x) = p(x_0 \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx ; \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$$

Dove x_0 appartenente all'intervallo $[A, B]$ è il valore argomentale di un individuo estratto casualmente da X .

Si definisce pertanto come “**probabilità infinitesima**” $dp = f(x)dx$ la probabilità di estrarre casualmente da X un individuo caratterizzato da un x_i appartenente all'intervallo $[x, x + dx]$; per cui la probabilità che X assuma valori interni all'intervallo finito o infinito $[a, b]$ è espressa come:

$$P(a \leq x \leq b) = F(b) - F(a) = \int_a^b f(x)dx$$

In forma grafica si considera la densità di probabilità come l'area sottesa alla funzione di **densità di probabilità $f(x)$** , o “**pdf: probability density function**”, tra le due ascisse a, b e che rappresenta la probabilità di accadimento dell'evento $(a \leq x \leq b)$. La medesima probabilità è rappresentata nella funzione di densità di distribuzione o **funzione di densità cumulata**, o “**cdf: cumulative density function**”, con la differenza delle due ordinate $F(b)$ e $F(a)$.

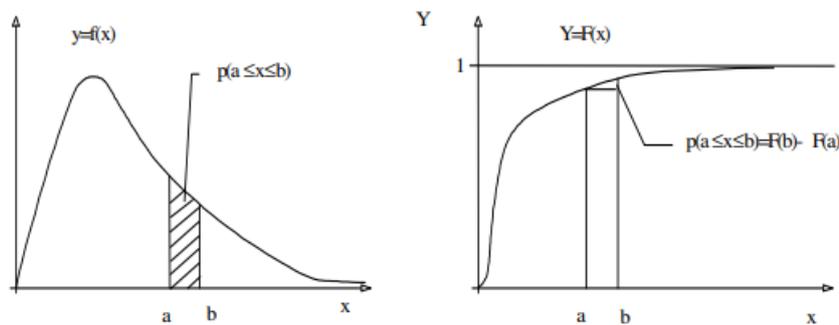


Figura 96: Pdf e Cdf di una variabile casuale X

5.3.3. Momenti di una variabile casuale come rappresentazione sintetica della funzione di distribuzione

I **momenti di una variabile casuale** sono degli indici che rappresentano una descrizione matematica della variabile casuale e vengono ricavati utilizzando tutti i valori argomentali che la compongono. Il calcolo di tali indici nel loro insieme permette di svolgere un'analisi statistica della variabile, permettendo confronti ed analisi della distribuzione.

Si definisce **momento k-iesimo** rispetto al polo θ una variabile casuale a una dimensione calcolabile come:

$$m_{k,\theta} = \int_{i=1}^n (x_i - \theta)^k \cdot f(x) d(x)$$

I momenti più significativi sono:

Il **momento di primo ordine** (k=1) rispetto al polo $\theta = 0$ che prende il nome di media:

$$m_{1,0} = \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - 0)^1 \cdot f(x) d(x) = \mu_x \quad (\text{variabile casuale continua})$$

$$m_{1,0} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot p_i = \mu_x \quad (\text{variabile casuale discreta})$$

Il **momento di secondo ordine** (k=2) rispetto al polo $\theta = 0$ che prende il nome di valore quadratico medio:

$$m_{2,0} = \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - 0)^2 \cdot f(x) d(x) = m_2 \quad (\text{variabile casuale continua})$$

$$m_{2,0} = \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot p_i = m_2 \quad (\text{variabile casuale discreta})$$

Il momento di secondo ordine (k=2) rispetto al polo $\theta = \mu_x$ che prende il nome di varianza:

$$m_{2,\mu_x} = \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - \mu_x)^2 \cdot f(x) d(x) = \sigma_x^2 \quad (\text{variabile casuale continua})$$

$$m_{2,\mu_x} = \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2 \cdot p_i = \sigma_x^2 \quad (\text{variabile casuale discreta})$$

Dall'indice varianza è possibile estrapolare lo **scarto quadratico medio o deviazione standard** σ_x . Il varore $(x_i - \mu_x)$ prende il nome di “**scarto**”.

Il **momento di terzo ordine** (k=3) è utilizzato per il calcolo dell'indice di asimmetria o **indice di Skewnees** γ ;

$$m_{3,\mu_x} = \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - \mu_x)^3 \cdot f(x) d(x)$$

$$\gamma = \frac{m_{3,\mu_x}}{\frac{m_{2,\mu_x}^2}{3}}$$

Per cui se l'indice di Skewnees γ è uguale a 0 la distribuzione è simmetrica, se minore di 0 è asimmetrica positiva e se maggiore di 0 è asimmetrica negativa.

Il **momento di quarto ordine** (k=4) è utilizzato per il calcolo dell'indice di appiattimento o spessore delle code, detto anche indice di Curtosi K .

$$m_{4,\mu_x} = \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - \mu_x)^4 \cdot f(x) d(x)$$

$$K = \frac{m_{4,\mu_x}}{\sigma_x^4}$$

Per cui se l'indice di Curtosi K è uguale a 3 è rappresentativo di una distribuzione normale, se maggiore rappresenta più dispersione nelle code, se minore un maggior appiattimento.

Gli indici di Skewnees e Curtosi vengono poi ridefiniti come **indici di Fisher**:

$$\text{Indice } \gamma_1 \text{ di Fisher} = \gamma$$

$$\text{Indice } \gamma_2 \text{ di Fisher} = K - 3$$

Utilizzati per comprendere se il comportamento di una distribuzione in analisi è associabile ad una distribuzione normale, confermato se risultano prossimi allo 0.

A questi indici, per la rappresentazione sintetica delle distribuzioni si aggiungono la “**moda**” e la “**mediana**”:

$$\check{\mu} = x_i : f(x_i) = \max (f(x))$$

$$\hat{\mu} = x_i : F(x_i) = 0.5$$

La **covarianza** tra due variabili si calcola nel seguente modo:

$$\sigma_{x_1x_2} = \int_{-\infty}^{\infty} (x_1 - \mu_{x_1})(x_2 - \mu_{x_2}) \cdot f(x_1, x_2) dx_1 dx_2$$

5.3.4. Indice di correlazione

Un indice molto noto nel campo statistico è “l'**indice di correlazione lineare** ρ_{xy} ”, che esprime il grado di correlazione di tipo lineare tra due variabili. L'indice può assumere valori compresi tra -1 e 1, e più è prossimo agli estremi, più le variabili sono correlate tra loro. Al contrario più assume un valore vicino allo 0 più le variabili sono tra loro scorrelate.

Si calcola come il rapporto tra la covarianza e il prodotto delle deviazioni standard delle due variabili, tutti valori estraibili dalla matrice di varianza covarianza delle variabili:

$$\rho_{x_1x_2} = \frac{\sigma_{x_1x_2}}{\sigma_{x_1}\sigma_{x_2}}$$

5.3.5. Distribuzione normale o di Gauss

La funzione di densità di probabilità di una variabile casuale **normale o gaussiana** X , di media e varianza nota, si definisce come:

$$f(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2}$$

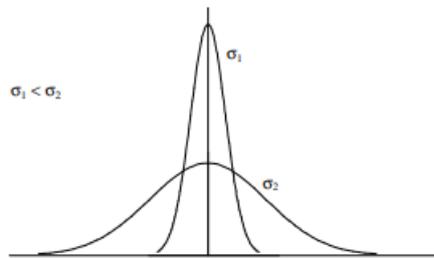


Figura 97: Distribuzione normale o gaussiana.

Le caratteristiche principali sono:

- è simmetrica rispetto alla retta $x = \mu$
- ha due flessi in corrispondenza dei punti $x = m + \sigma$ e $x = m - \sigma$
- al crescere di σ^2 la curva si appiattisce e viceversa al diminuire diventa più aguzza
- il suo dominio è definito in $[-\infty, +\infty]$, e $\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1$

Nota la standard deviation σ , il 68,3% dei valori argomentali è compreso nell'intervallo $[m - \sigma, m + \sigma]$, il 95,4% è compreso nell'intervallo $[m - 2\sigma, m + 2\sigma]$ e il 99,7% è compreso nell'intervallo $[m - 3\sigma, m + 3\sigma]$.

b	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.0	0.0000	0.0040	0.0080	0.0120	0.0160	0.0199	0.0239	0.0279	0.0319	0.0359
0.1	0.0398	0.0438	0.0478	0.0517	0.0557	0.0596	0.0636	0.0675	0.0714	0.0754
0.2	0.0793	0.0832	0.0871	0.0910	0.0948	0.0987	0.1026	0.1064	0.1103	0.1141
0.3	0.1179	0.1217	0.1255	0.1293	0.1331	0.1368	0.1406	0.1443	0.1480	0.1517
0.4	0.1554	0.1591	0.1628	0.1664	0.1700	0.1736	0.1772	0.1808	0.1844	0.1879
0.5	0.1915	0.1950	0.1985	0.2019	0.2054	0.2088	0.2123	0.2157	0.2190	0.2224
0.6	0.2258	0.2291	0.2324	0.2357	0.2389	0.2422	0.2454	0.2486	0.2518	0.2549
0.7	0.2580	0.2612	0.2642	0.2673	0.2704	0.2734	0.2764	0.2794	0.2823	0.2852
0.8	0.2881	0.2910	0.2939	0.2967	0.2996	0.3023	0.3051	0.3078	0.3106	0.3133
0.9	0.3159	0.3186	0.3212	0.3238	0.3264	0.3289	0.3315	0.3340	0.3365	0.3389
1.0	0.3413	0.3438	0.3461	0.3485	0.3508	0.3531	0.3554	0.3577	0.3599	0.3621
1.1	0.3643	0.3665	0.3686	0.3708	0.3729	0.3749	0.3770	0.3790	0.3810	0.3830
1.2	0.3849	0.3869	0.3888	0.3907	0.3925	0.3944	0.3962	0.3980	0.3997	0.4015
1.3	0.4032	0.4049	0.4066	0.4082	0.4099	0.4115	0.4131	0.4147	0.4162	0.4177
1.4	0.4192	0.4207	0.4222	0.4236	0.4251	0.4265	0.4279	0.4292	0.4306	0.4319
1.5	0.4332	0.4345	0.4357	0.4370	0.4382	0.4394	0.4406	0.4418	0.4429	0.4441
1.6	0.4452	0.4463	0.4474	0.4484	0.4495	0.4505	0.4515	0.4525	0.4535	0.4545
1.7	0.4554	0.4564	0.4573	0.4582	0.4591	0.4599	0.4608	0.4616	0.4625	0.4633
1.8	0.4641	0.4649	0.4656	0.4664	0.4671	0.4678	0.4686	0.4693	0.4699	0.4706
1.9	0.4713	0.4719	0.4726	0.4732	0.4738	0.4744	0.4750	0.4756	0.4761	0.4767
2.0	0.4772	0.4778	0.4783	0.4788	0.4793	0.4798	0.4803	0.4808	0.4812	0.4817
2.1	0.4821	0.4826	0.4830	0.4834	0.4838	0.4842	0.4846	0.4850	0.4854	0.4857
2.2	0.4861	0.4864	0.4868	0.4871	0.4875	0.4878	0.4881	0.4884	0.4887	0.4890
2.3	0.4893	0.4896	0.4898	0.4901	0.4904	0.4906	0.4909	0.4911	0.4913	0.4916
2.4	0.4918	0.4920	0.4922	0.4925	0.4927	0.4929	0.4931	0.4932	0.4934	0.4936
2.5	0.4938	0.4940	0.4941	0.4943	0.4945	0.4946	0.4948	0.4949	0.4951	0.4952
2.6	0.4953	0.4955	0.4956	0.4957	0.4959	0.4960	0.4961	0.4962	0.4963	0.4964
2.7	0.4965	0.4966	0.4967	0.4968	0.4969	0.4970	0.4971	0.4972	0.4973	0.4974
2.8	0.4974	0.4975	0.4976	0.4977	0.4977	0.4978	0.4979	0.4979	0.4980	0.4981
2.9	0.4981	0.4982	0.4982	0.4983	0.4984	0.4984	0.4985	0.4985	0.4986	0.4986
3.0	0.4987	0.4987	0.4987	0.4988	0.4988	0.4989	0.4989	0.4989	0.4990	0.4990
3.1	0.4990	0.4991	0.4991	0.4991	0.4992	0.4992	0.4992	0.4992	0.4993	0.4993
3.2	0.4993	0.4993	0.4994	0.4994	0.4994	0.4994	0.4994	0.4995	0.4995	0.4995
3.3	0.4995	0.4995	0.4995	0.4996	0.4996	0.4996	0.4996	0.4996	0.4996	0.4997
3.4	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4997	0.4998
3.5	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998	0.4998
3.6	0.4998	0.4998	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999
3.7	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999
3.8	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999	0.4999
3.9	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000

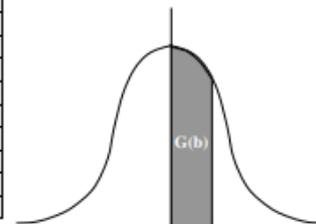


Tabella 1: Area sottesa della curva normale standardizzata correlata a uno specifico valore dell'intervallo di confidenza.

5.3.6. Teorema centrale della statistica

Un teorema fondamentale nella teoria delle misure che ha permesso di applicare i processi analisi statistica spiegati nel capitolo successivo è il “**Teorema centrale della statistica**”.

Il “Teorema centrale della statistica” afferma che se il campione statistico appena citato è abbastanza numeroso (convenzionalmente superiore o uguale a 30, nel caso dei dataset Raster si parla di migliaia di variabili) allora la successione $S_n = \sum_{i=1}^n x_i$ tende asintoticamente alla distribuzione normale gaussiana $N[n\mu, n\sigma^2]$. Con l'ipotesi che n tenda ad infinito, la media campionaria e la varianza campionaria coincidono con la media e varianza della variabile statistica:

$$m(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \mu_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - 0)^1 \cdot f(x) dx$$

$$\sigma^2(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m(x_i))^2 = \sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_x)^2 \cdot f(x) dx$$

Per lo stesso principio si può affermare che anche l'errore di misura ($\in N [n\mu, n\sigma^2]$) e la media campionaria seguiranno una distribuzione normale ($\in N [n\frac{\mu}{n}, n\frac{\sigma^2}{n^2}]$).

Da qui si parla di “**statistica campionaria**” che definisce tutti gli operatori statistici (media campionaria, varianza campionaria, indice di correlazione campionario ecc.) come anch'essi variabili casuali in funzione della variabile X n-dimensionale.

Per il calcolo delle statistiche campionarie si utilizzano le seguenti formule:

$$m(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$\sigma^2(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m(x_i))^2$$

$$m_3(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m(x_i))^3$$

$$m_4(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m(x_i))^4$$

Ciò ha permesso di considerare le curve di frequenza empiriche campionarie successivamente calcolate come rappresentanti della “popolazione” e non solo del “campione” in analisi, senza avere la necessità di associarle a distribuzioni statistiche mediante il metodo di inferenza statistica dei momenti, trascurandone la “**variabilità campionaria**”.

5.3.7. Secondo corollario del teorema della media e Principio di propagazione della varianza

Noto “**il secondo corollario del teorema della media**” per cui una funzione $y = g(x)$, di cui x, variabile casuale caratterizzata da σ_x piccoli e $g(x)$ funzione caratterizzata da un andamento regolare e continuo nell'intorno di μ_x , la media della variabile casuale y è calcolabile come:

$$\mu_y = M[y] = g(\mu_x)$$

“Il principio di propagazione della varianza” esprime σ_y in funzione di σ_x tale che:

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial g(x)}{\partial x} \right)^2 \cdot \sigma_x^2$$

$$\sigma_y^2 = (g'(\mu_x))^2 \cdot \sigma_x^2$$

Dove la media, o momento di prim'ordine rispetto all'origine, e la varianza, o momento di secondo ordine rispetto alla media, sono calcolabili in questo modo, nota la funzione di densità di probabilità $f(x)$:

$$\mu_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - 0)^1 \cdot f(x) dx$$

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_x)^2 \cdot f(x) dx$$

Nel caso la variabile y dipenda da più variabili casuali x_1, x_2, \dots, x_n , la propagazione della varianza **per funzione non lineari e incorrelate** si esplicita come:

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial g}{\partial x_1} \right)_{(0)}^2 \cdot \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial x_2} \right)_{(0)}^2 \cdot \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial g}{\partial x_n} \right)_{(0)}^2 \cdot \sigma_{x_n}^2$$

mediante l'approssimazione di Taylor:

$$\begin{aligned} g(x_1, x_2, \dots, x_n) &= g(x_1^{(0)}, x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) + \left(\frac{\partial g}{\partial x_1} \right)_{(0)}^2 (x_1 - x_1^{(0)}) + \dots + \left(\frac{\partial g}{\partial x_n} \right)_{(0)}^2 (x_n - x_n^{(0)}) \\ &+ \text{termini trascurabili} \end{aligned}$$

Dove:

$$x_i = x_i^{(0)} + \bar{x}_i$$

In forma matriciale, definite le variabili Y e X ($X \in \mathbb{R}^n$, $Y \in \mathbb{R}^m$, $n \leq m$) legate dall'operatore $Y=AX$, la matrice A detta “**matrice delle derivate parziali**” o “**matrice Jacobiana**” sarà composta in questo modo:

$$A = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial g_1}{\partial x_1}\right)_{(0)}^2 & \dots & \left(\frac{\partial g_1}{\partial x_n}\right)_{(0)}^2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial g_n}{\partial x_1}\right)_{(0)}^2 & \dots & \left(\frac{\partial g_n}{\partial x_n}\right)_{(0)}^2 \end{bmatrix}$$

Nel caso la funzione $g(x)$ sia una **funzione lineare** tale che $y = a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c$, la formula è semplificabile in:

$$\sigma_y^2 = a^2 \cdot \sigma_{x1}^2 + b^2 \cdot \sigma_{x2}^2$$

Ora nel caso si presuppone un operatore lineare A , di dimensioni (n,m) di cui $n \leq m$, tale che $Y = AX$, con $X \in \mathbb{R}^n$ e $Y \in \mathbb{R}^m$ variabili casuali, si può dimostrare che la matrice di varianza covarianza di Y , detta C_{yy} , sarà uguale a:

$$C_{yy} = A C_{xx} A^T$$

dove la **matrice di varianza covarianza** C_{xx} è così composta:

$$C_{xx} = \begin{bmatrix} \sigma_{x1}^2 & \sigma_{x1x2} & \sigma_{x1xn} \\ \sigma_{x1x2} & \sigma_{x2}^2 & \sigma_{x2x3} \\ \sigma_{x1xn} & \sigma_{x2x3} & \sigma_{xn}^2 \end{bmatrix}$$

5.3.8. Stima ai minimi quadrati

La “**Stima ai minimi quadrati**” è fortemente utilizzata nel campo della teoria delle misure perché permette di raggiungere il miglior risultato per il calcolo di grandezze indirette, sfruttando la ridondanza progettabile nei processi di misura e gestendo le differenti precisioni di cui sono solitamente soggetti. Il risultato dei processi di misura sono sistemi di n equazioni con r incognite (di cui $n > r$), riscrivibili in forma matriciale nella seguente forma:

$$AX - lo = v$$

dove A è la **matrice disegno** di dimensioni r,n ; lo è il vettore delle **misure** soggette a diverse precisioni e composto da n elementi; v è il vettore degli errori intrinseci al processo di misura, detto **scarto**, e composto da n elementi; X sono le grandezze indirette da calcolare dette incognite,

composto da r elementi. Il processo di stima ai minimi quadrati è il principio di massima verosimiglianza applicato alla distribuzione normale.

Ora, nota la funzione di densità di probabilità di una variabile casuale x_i secondo la distribuzione normale $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2}$, e assumendo l'indipendenza delle variabili x_1, x_2, \dots, x_n , per il teorema della probabilità composta, la probabilità del campione di n elementi è calcolabile come il prodotto delle probabilità delle variabili di cui è composto:

$$dP = P(x_1, x_2, \dots, x_n, m(x_i), \sigma(x_i)^2) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{n}{2}}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} (do)^n$$

Il “**Principio di massima verosimiglianza o Likelyhood**” definisce la funzione di verosimiglianza come: $V = \frac{1}{(2\pi\sigma(x_i)^2)^{\frac{n}{2}}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (x_i - m(x_i))^2}$, e introducendo un peso proporzionale

all'inverso della varianza della misura ($P = \sigma_0^2 C_{LL}^{-1}$) si esplica come:

$$V = \frac{(p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_n)^{1/2}}{(2\pi\sigma(x_i)^2)^{\frac{n}{2}}} e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n p_i (x_i - m(x_i))^2}$$

L'obbiettivo del processo di calcolo è trovare il valore di $m(x_i)$ tale che la probabilità, ovvero la funzione di massima verosimiglianza, sia massima.

Per il processo di calcolo in forma matriciale ai minimi quadrati si introducono i seguenti **vincoli** che tra tutte le stime minimizzano la sommatoria degli scarti quadratici ($\sum_{i=1}^n p_i v_i^2 = \min$):

$$\begin{cases} \frac{\partial \sum_{i=1}^n p_i v_i^2}{\partial x_1} = 0 \\ \vdots \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^n p_i v_i^2}{\partial x_r} = 0 \end{cases}$$

Introducendo la **matrice dei pesi P** :

$$P = \begin{bmatrix} p_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & p_n \end{bmatrix}$$

$$PAX - Pl_0 = Pv$$

Ora è possibile stimare le incognite \hat{x} , gli scarti \hat{v} , la varianza in unità di peso $\hat{\sigma}_0^2$, la matrice di varianza covarianza C_{xx} delle incognite, la matrice di ridondanza R e la matrice di varianza covarianza C_{vv} degli scarti:

$$\hat{X} = N^{-1}T_N \quad \text{dove: } N = A^T P A, \quad T_n = A^T P l o ;$$

$$\hat{v} = A\hat{x} - l o = \hat{l} - l o$$

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{v}^T P \hat{v}}{n - r}$$

$$C_{xx} = \hat{\sigma}_0^2 N^{-1}$$

$$R = I - A N^{-1} A^T P$$

$$C_{vv} = \hat{\sigma}_0^2 R P^{-1}$$

5.4. Analisi differenziale tra DSM

5.4.1. Introduzione

Le differenze di elevazione della superficie del ghiacciaio sono state stimate sottraendo tra loro i DSMs dei rilievi 2020,2021,2022,2023 e 2024, al fine di quantificare l'ablazione e lo spostamento del ghiacciaio. Per far ciò è stato necessario inizialmente calcolare la precisione dei prodotti cartografici utilizzati affinché il risultato fosse rappresentativo del processo in analisi. Si sono stimate le varianze caratteristiche dei DSMs estrapolandone delle aree definite “**geologicamente stabili**”, nel primo caso nelle vicinanze dei GCPs utilizzati per l’elaborazione del modello fotogrammetrico, nel secondo nell’area sottostante il fronte occidentale del ghiacciaio esente da GCPs. Il calcolo è basato sul “**principio di propagazione della varianza**”, che inizialmente è stato applicato con l’ipotesi di stessa precisione dei vari DSMs, nel secondo essendo disponibili più rilievi della stessa area, si è utilizzata una stima ai minimi quadrati potendo così apprezzare le differenze caratteristiche dei vari voli. Si sono infine stimate le variazioni del ghiacciaio nel quinquennio 2020-2024 mediante il calcolo della media e della standard deviation della variazione tra DSMs (DoD) escludendo le aree soggette a variazioni non imputabili ai processi di ritiro con un’analisi statistica del campione.

Nel campione è importante siano inclusi solo gli errori del modello fotogrammetrico e non dovuti a spostamenti reali del ghiacciaio, al suo processo ablativo, ai processi gravitativi minori che caratterizzano il fronte, alle precipitazioni nevose ancora presenti e agli errori della fotogrammetria nel caso di superfici monotone e riflettenti come il caso dei laghi. Inoltre, date le piccole dimensioni del campione è importante che quest’ultimo segua un andamento di distribuzione normale e che quindi sia caratterizzato da un numero sufficiente di variabili.

5.4.2. Definizione delle aree stabili

Per la definizione delle aree stabili si è utilizzato il software QGis che fornisce la possibilità di visualizzare il file Raster imponendo delle soglie ai DN. Si sono visualizzati i valori compresi tra -0.3 e 0.3 m dei DoD, evidenziando così le aree che potessero potenzialmente rappresentare le zone stabili tra le varie acquisizioni fotogrammetriche. L’intervallo selezionato è limitato da valori che ragionevolmente ci aspettiamo rappresentino la precisione dei prodotti cartografici. Per far ciò si è calcolata la differenza tra Raster con il tool “Raster Calculator” e sono state rese trasparenti le

aree di nostro interesse. A questo punto, con un processo foto-interpretativo, si sono selezionate delle sotto aree rappresentati affioramenti della geologia sottostante o zone sicuramente stabili perché riconoscibili nella stessa posizione tra le varie ortofoto generate, per cui nello studio probabilistico del campione, gli errori presenti nell'area sono imputabili al processo fotogrammetrico e non a spostamenti reali sito-specifici. Si nota però che nel processo è stata inclusa una frana di piccole dimensioni nel complesso morenico sottostante, che comunque è stata esclusa dal calcolo eliminando il 5% dei dati appartenenti alle code superiore e inferiore della distribuzione del dataset (figura 110 – Analisi 2023-2024).

L'analisi statistica è stata svolta con il software Matlab, e come file di input sono state caricate i file .tiff delle aree estrapolate mediante il tool Qgis “**Clip Raster by mask layer**” imponendo l'estrazione con risoluzione massima dai DSMs.

È importante notare che valutando mediante questo metodo la precisione dei prodotti cartografici fotogrammetrici si riesce ad avere un risultato rappresentate buone parti delle regioni monitorate e non solo pochi punti noti della nuvola di punti esaminati con il metodo della valutazione dei QCP.

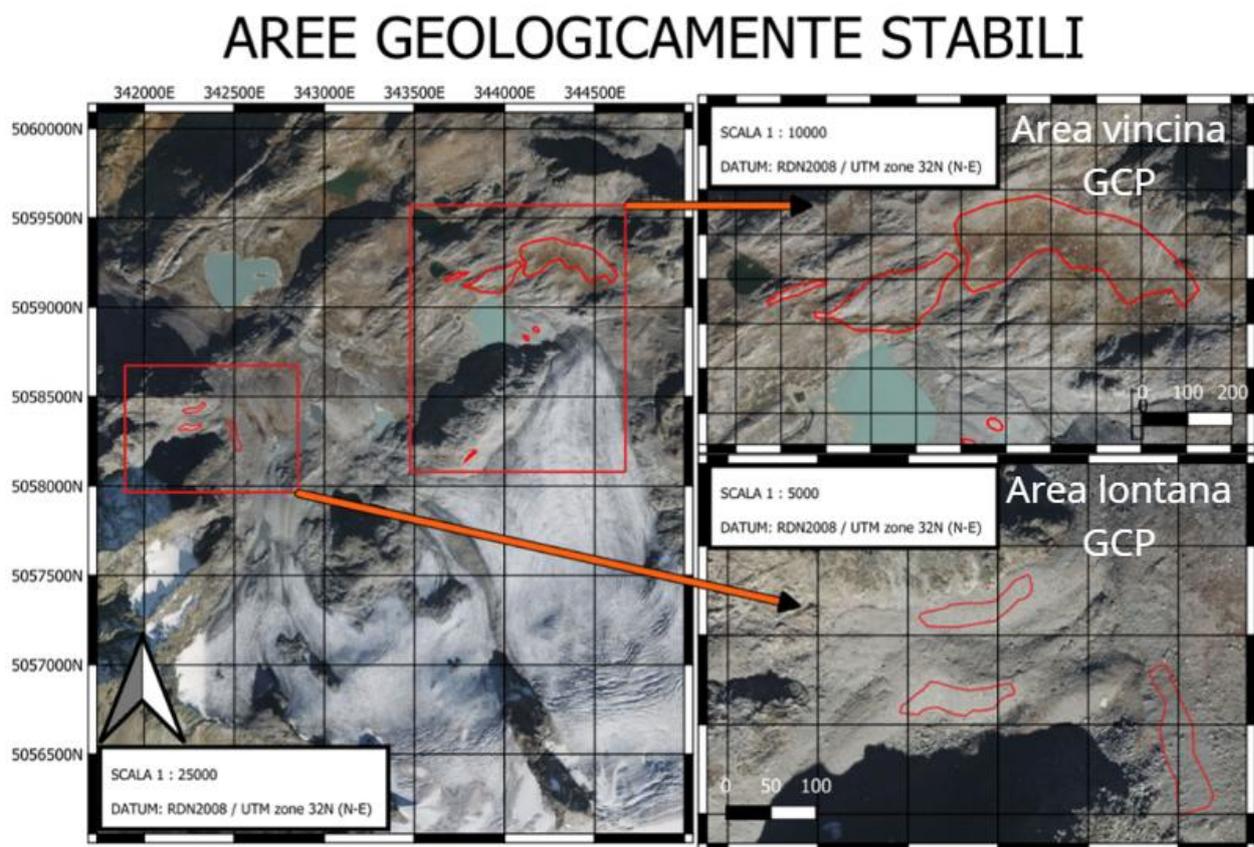


Figura 98: Aree stabili vicine e lontane dai GCPs

5.4.3. Analisi dell'indice di correlazione tra DSMs delle aree stabili vicine ai GCPs e analisi statistica dei DoDs (Difference of DSMs)

Inoltre per confermare l'immutabilità temporale delle aree stabili si è calcolato l'indice di correlazione tra i vari DSM nei diversi anni, che risulta per ogni coppia di DSM prossimo a 1.000 e visibile come primo risultato in ogni coppia di annate analizzata successivamente. Si sono estrapolati i valori dei DN delle aree stabili per ogni anno e costruiti i campioni statistici, ne si è calcolata, per ognuno, lo scarto quadratico medio, covarianza e indice di correlazione. Inoltre si è fatta un'analisi specifica della correlazione tra porzioni dei DSM, selezionate perché origine degli outliers caratterizzanti il DoD, che nel momento in cui il campione diventa abbastanza numeroso risulta essere asintotico ad 1 (figura 99). In questo caso il calcolo della correlazione è ricaduto su campioni dei DSM la cui differenza dei pixel omologhi ricadesse nelle code della distribuzione del campione DoD (Difference of DSMs), ripetendo il processo con il variare del livello di significatività e quindi della dimensione delle code da cui sono estratti i DN del DSM utilizzati per il calcolo della correlazione (figura 99). L'analisi svolta ha la finalità di comprendere se le zone stabili siano morfologicamente simili e esenti da variazioni, e quindi la correlazione tra stesse aree in diversi modelli dovrebbe pertanto tendere a 1. Ciò ci permette di escludere i casi in cui ciò non avviene con un certo intervallo di probabilità fissato per meglio capire la probabilità dell'ipotesi che le aree siano effettivamente le stesse.

Viene successivamente calcolata la media, come stimatore "robusto" che generalmente è poco influenzato dagli outliers, e la deviazione standard con e senza la presenza delle code nella distribuzione, ed in seguito confrontati tra i vari anni. Vengono poi calcolati gli indici di Fisher per comprendere la normalità delle distribuzioni e in fine viene propagata la varianza per il calcolo della precisione dei DoD ottenendo il LoD (Limit of Detection) al 95% (2σ).

Facendo ciò nel confronto tra DSM si vogliono mettere in evidenza le curve cumulate di frequenza dei residui con l'esclusione delle code che corrispondono ad errori grossolani visibili nella figura 102 come punti bianchi su sfondo nero. Da tali figure è possibile apprezzare dove la correlazione ha fallito, spesso in zone monotone come tessitura, acqua, laghi e torrenti, o la presenza di fenomeni gravitativi che modificano la morfologia del territorio. Per ottenere ciò sono stati implementati script che permettono l'imposizione di soglie sulle curve cumulate definendo gli intervalli di probabilità mediante intervalli di significatività alpha.

I grafici visibili solo nel processo di calcolo 2020 – 2021 permettono una maggiore conoscenza del campione, scelta delle soglie da imporre all'analisi statistica e miglior conoscenza dei risultati.

Sono stati calcolati per tutte le differenze in analisi, ma vista l'uguaglianza dei risultati, si è evitato di esporli per tutte le coppie di differenze.

2020-2021

Indice di correlazione = 0.9999953 (calcolato tra i DSM completi)

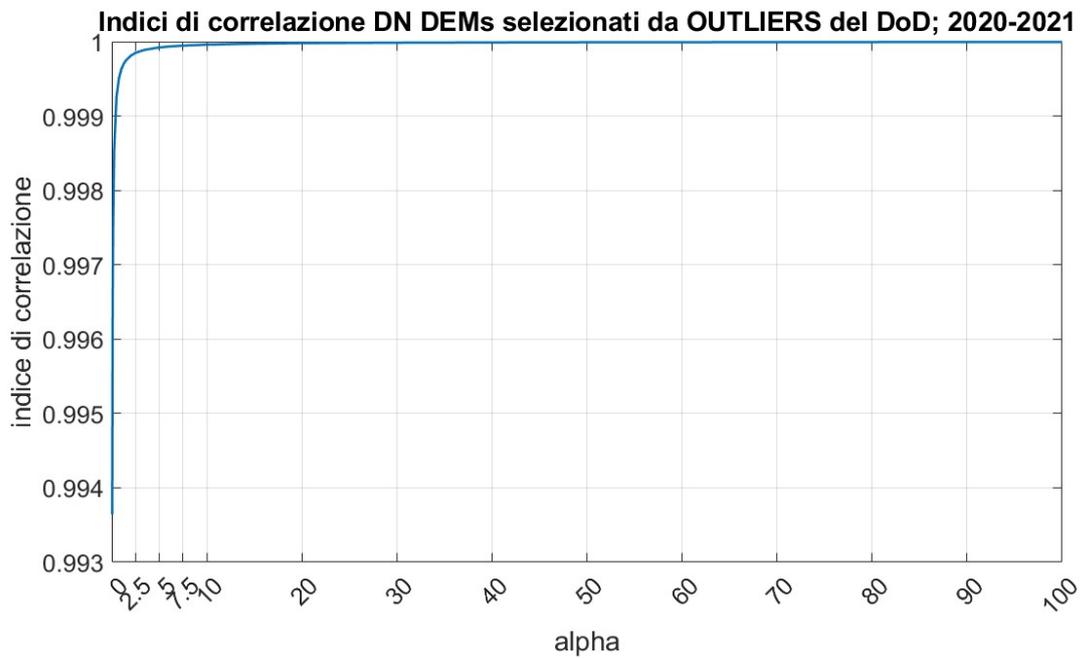


Figura 99: Indice di correlazione tra i DSMs al variare del livello di significatività alpha applicato al DoD 2020-2021.

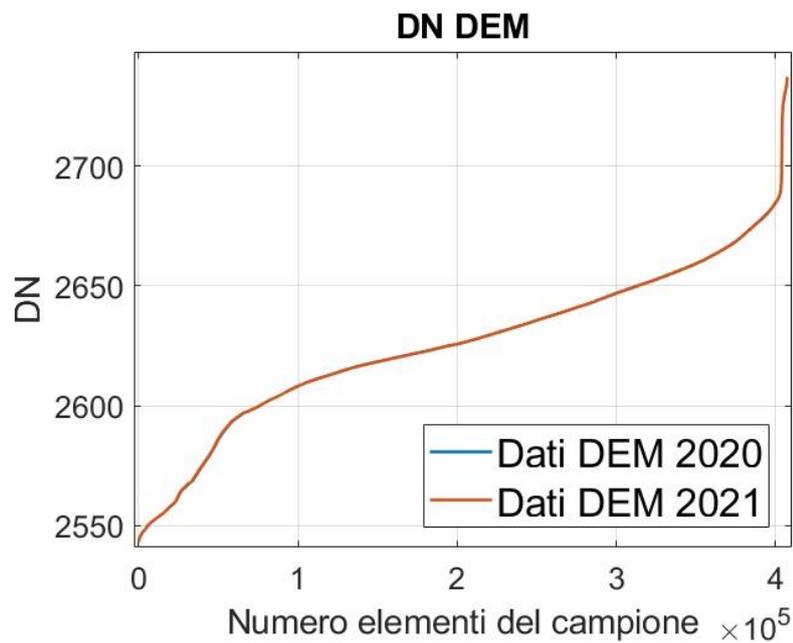


Figura 100: DN appartenenti ai DSMs 2020-2021

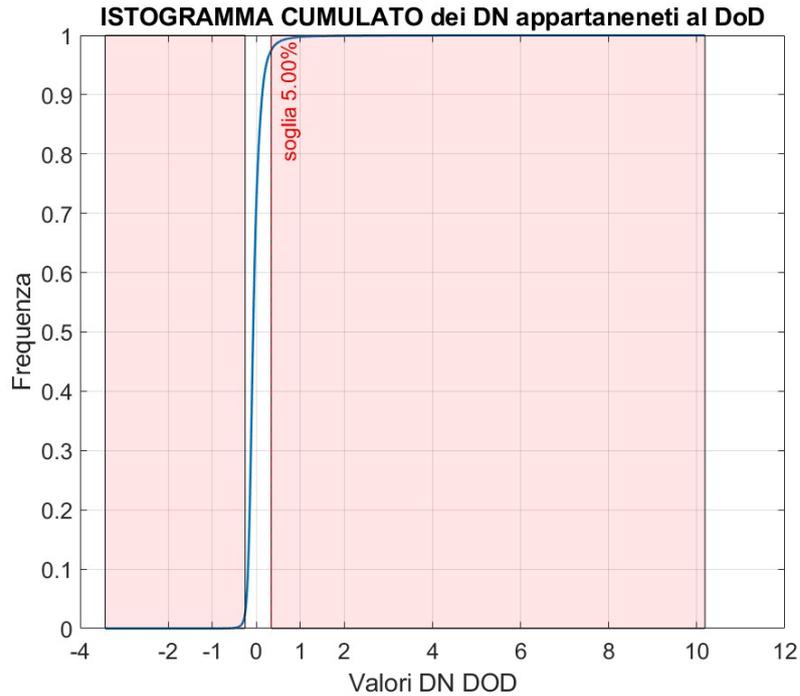


Figura 101: Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2020-2021

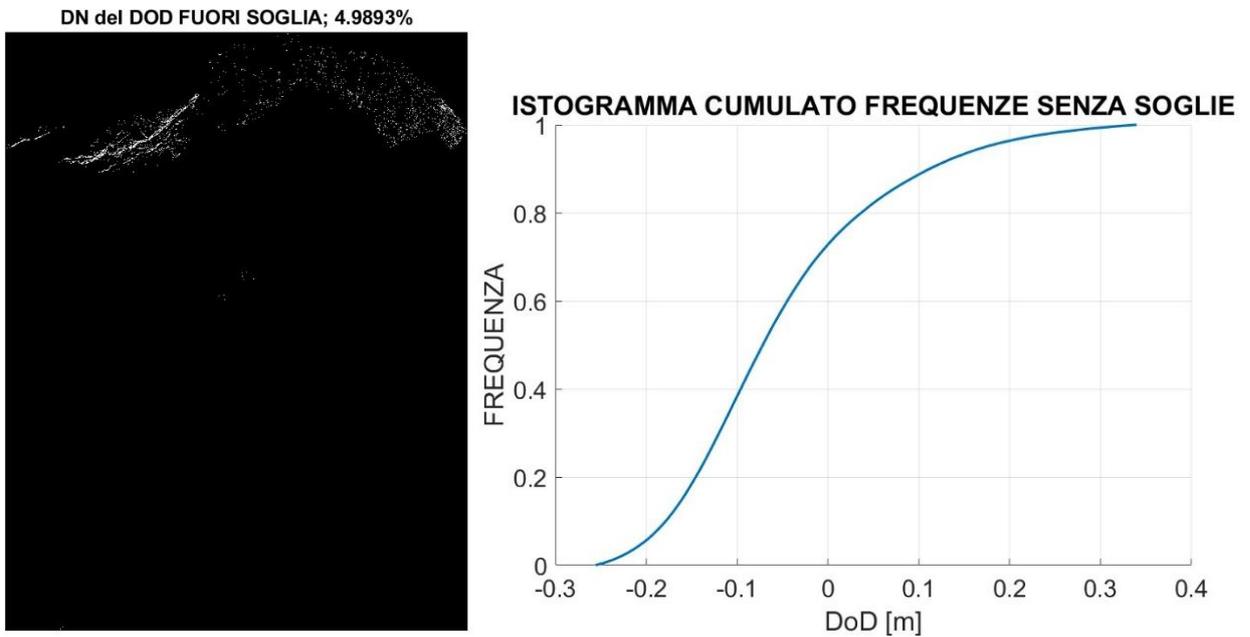


Figura 102: Figura sinistra: Rappresentazione dei DN esclusi dal calcolo perché nelle code della distribuzione 2020-2021; Figura destra: Curva di frequenza del DoD senza le code (soglia 5%) 2020-2021

RISULTATI alpha 5%

Soglie definite dal livello di significatività alpha:	-0.2556/0.3395
valori sopra soglia:	20332
%valori sopra soglia:	4.992
mediana -0.07177 media -0.04043 sqm	0.1823
media senza code	-0.05109
<u>sqm senza code</u>	<u>0.1137</u>
Skewnees - indice gamma Fisher	0.854
Curtosi - indice gamma2 Fisher	0.5142

RISULTATI alpha 1 %

Soglie definite dal livello di significatività alpha	-0.3525/0.7416
valori sopra soglia:	4071
% valori sopra soglia:	0.999
mediana -0.0717 media -0.0404 sqm	0.1823
media senza code	-0.0453
<u>sqm senza code</u>	<u>0.1386</u>
Skewnees - indice gamma Fisher	1.4304
Curtosi - indice gamma2 Fisher	3.584

I risultati rivelano un indice di correlazione tra i DSM pressoché unitario e anche l'indice di correlazione al variare del livello di significatività del DoD non presenta numeri di outliers elevati. L'analisi statistica è stata svolta con due livelli di significatività differenti (1% e 5%): lo scarto quadratico medio senza le code della distribuzione non evidenzia differenze importanti (2,5cm), al contrario degli indici gamma di Fisher, che nel caso di alpha 1 % hanno evidenziato una distribuzione distante dalla canonica normale, indicando una distribuzione asimmetrica e con una forte dispersione di dati nelle code, indice di presenza di outliers.

Imponendo un livello di significatività del 5%, gli indici gamma di Fisher sono entrambi vicini allo 0, indicando una buona curva di frequenza empirica riconducibile alla distribuzione Gaussiana. La deviazione standard senza code risulta 0.1137 m, con un LoD (95%) di 0.2274 m.

Per questo, nell'analisi delle coppie di anni successive si è deciso di utilizzare un alpha pari a 5%, largamente utilizzato nel campo topografico per l'esclusione degli outliers.

Inoltre si nota un'importante differenza nel DoD svolto con il tool "**Raster calculator**" disponibile su Qgis, rispetto all'utilizzo di Matlab. Il prodotto elaborato dal software GIS è caratterizzato da un numero di pixel fortemente inferiore (# DN =25515) rispetto al dato elaborato dal programma di calcolo Matlab (# DN=407220). Ciò è probabilmente una conseguenza di processi di ricampionamento che accelerano i tempi di restituzione dei risultati, rendendone però minore la risoluzione spaziale. Anche i risultati dell'analisi statistica svolta sul DoD calcolato dal GIS variano considerevolmente:

RISULTATI alpha 1%

Soglie definite dal livello di significatività alpha	-0.863/0.156
media senza code	-0.296
<u>sqm senza code</u>	<u>0.1760</u>
Skewnees - indice gamma Fisher	-0.182
Curtosi - indice gamma2 Fisher	-0.496

Per questo motivo si è deciso di proseguire l'analisi calcolando la differenza tra DSM con Matlab, vista la maggiore completezza del campione e della maggiore conoscenza dei processi di calcolo ad esso applicati.

2021-2022

Indice di correlazione: 0.9999968

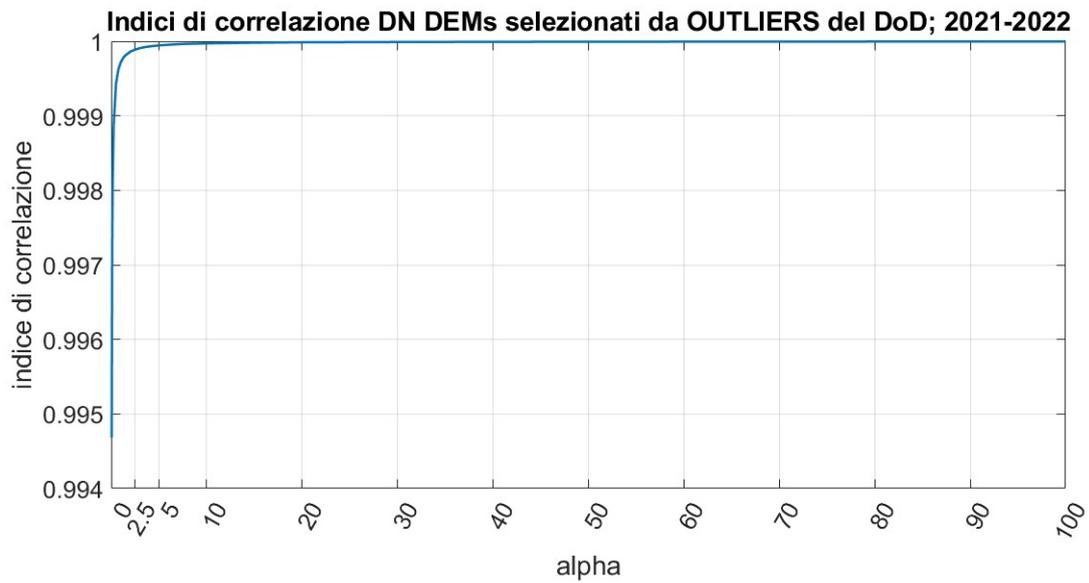


Figura 103: Indice di correlazione tra i DSMs al variare del livello di significatività α applicato al DoD 2021-2022.

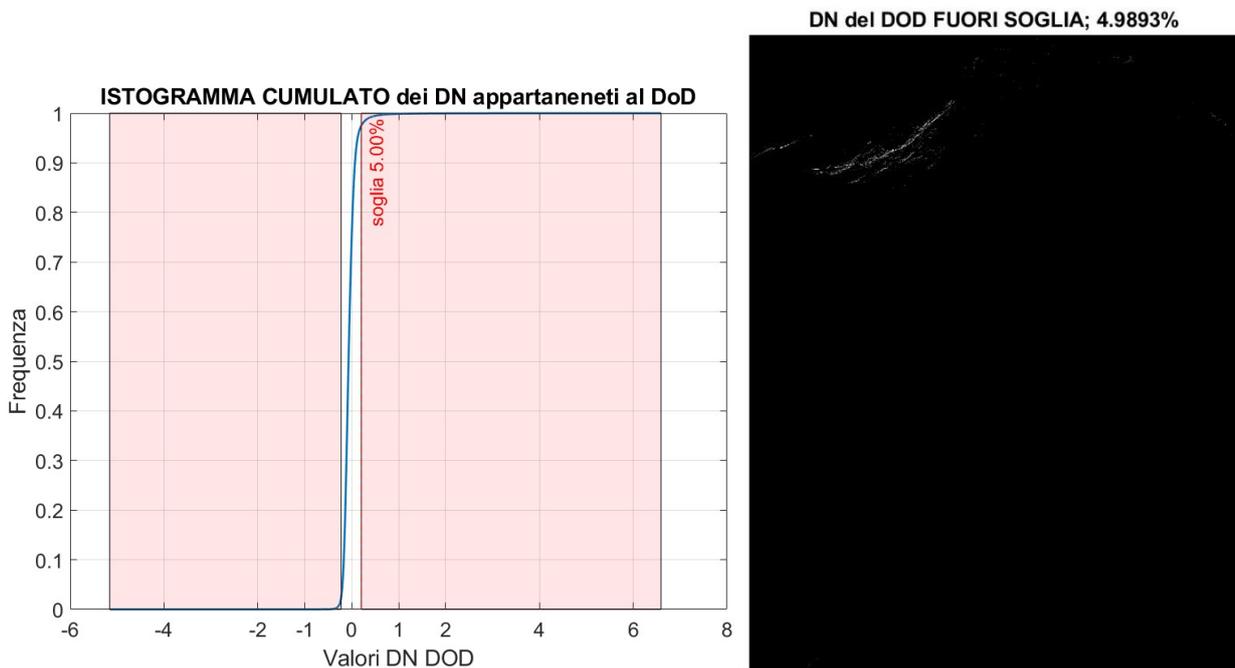


Figura 104 Figura sinistra: Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività α ed esclusione delle code 2021-2022
Figura destra : DN esclusi dal calcolo 2021-2022

RISULTATI alpha 5%

Soglie definite dal livello di significatività	
alpha:	-0.2204/0.2053
valori sopra soglia:	20315
%valori sopra soglia:	4.9893
mediana-0.0661 media -0.0501m sqm	0.1341
media senza code	-0.0571
<u>sqm popolazione senza code</u>	<u>0.0836</u>
Skewnees - indice gamma Fisher	0.4938
Curtosi - indice gamma2 Fisher	-0.1279

I risultati rivelano un indice di correlazione tra i DSM pressoché unitario, ma migliore rispetto alla coppia 2020 2021. Anche l'indice di correlazione al variare del livello di significatività del DoD non presenta outliers significativi. Gli indici gamma di Fisher sono entrambi valori vicini allo 0, indice di una buona curva di frequenza empirica riconducibile alla distribuzione Gaussiana. La deviazione standard senza code risulta 0.0836 m, con un LoD (95%) di 0.1672 m migliore del caso precedente.

2022 – 2023

Indice di correlazione : 0.9999954

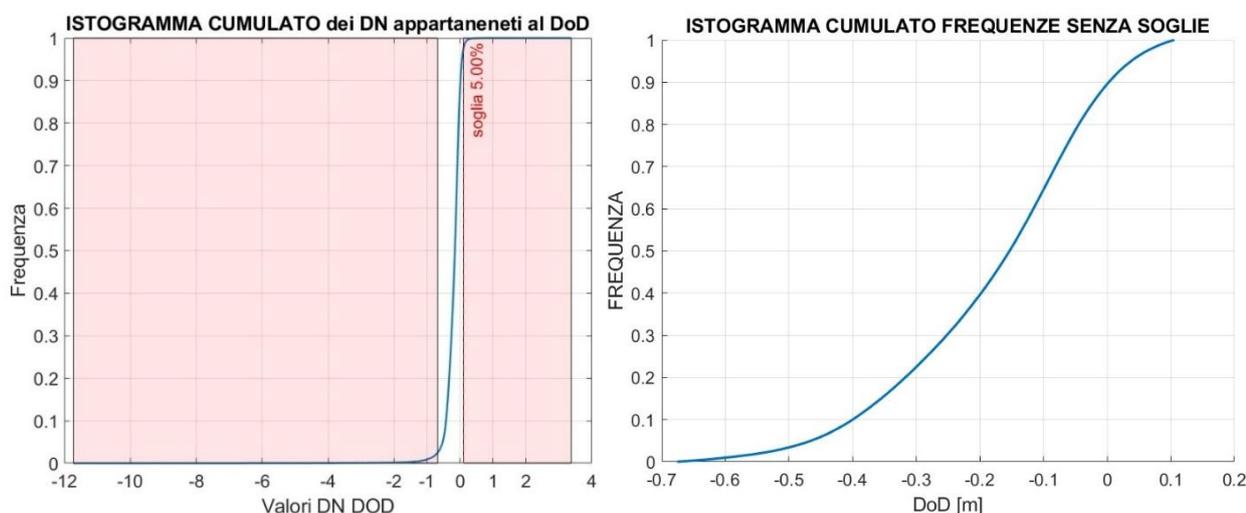


Figura 105: Figura sinistra: Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2022-2023

Figura destra: Curva di frequenza del DoD senza le code 2022-2023

RISULTATI alpha 5%

Soglie definite dal livello di significatività alpha	-0.6757/0.1049
valori sopra soglia:	20276
% valori sopra soglia:	4.9901
mediana	-0.1535
media	-0.1947
sqm	0.2538
media senza code	-0.1802
<u>sqm senza code</u>	<u>0.1552</u>
Skewnees - indice gamma Fisher	-0.6022
Curtosi - indice gamma2 Fisher	-0.1284

I risultati rivelano un indice di correlazione tra i DSM pressoché unitario e simile alla coppia 2020-2021. Anche l'indice di correlazione al variare del livello di significatività del DoD non presenta outliers significativi. Gli indici gamma di Fisher sono entrambi valori vicini allo 0, indice di una buona curva di frequenza empirica riconducibile alla distribuzione Gaussiana. La deviazione standard senza code risulta 0.1552 m, con un LoD (95%) di 0.3104.

2023-2024

Indice di correlazione: 0.9999937

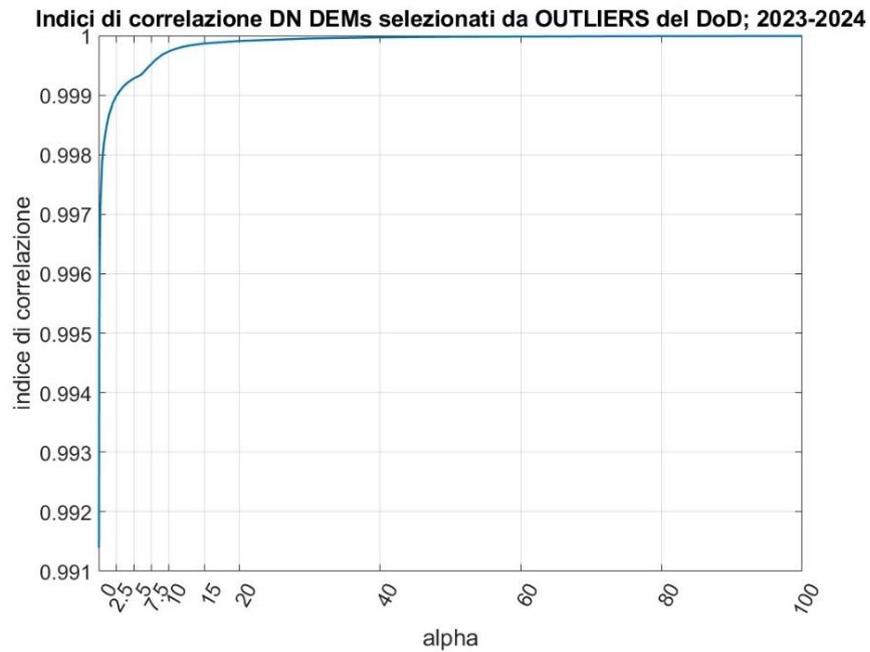


Figura 106: Indice di correlazione tra i DSMs al variare del livello di significatività alpha applicato al DoD. 2023-2024

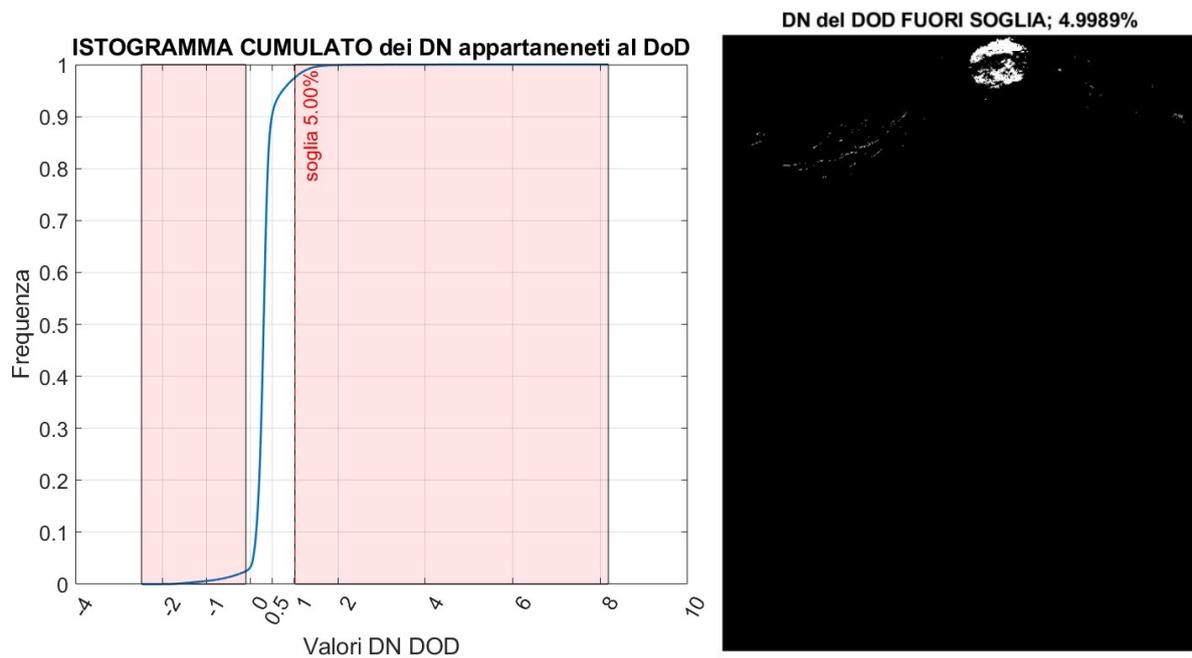
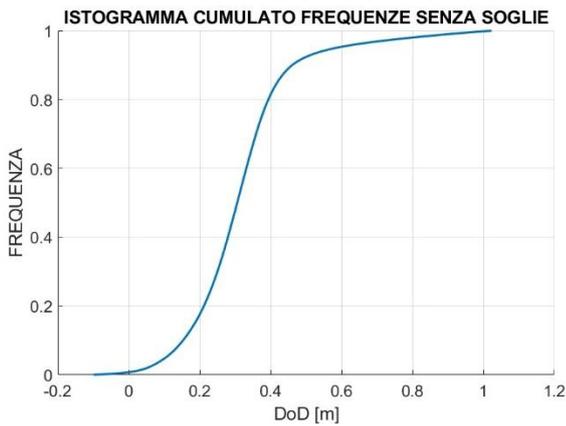


Figura 107: Figura sinistra: Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2023-2024
Figura destra : DN esclusi dal calcolo 2023-2024



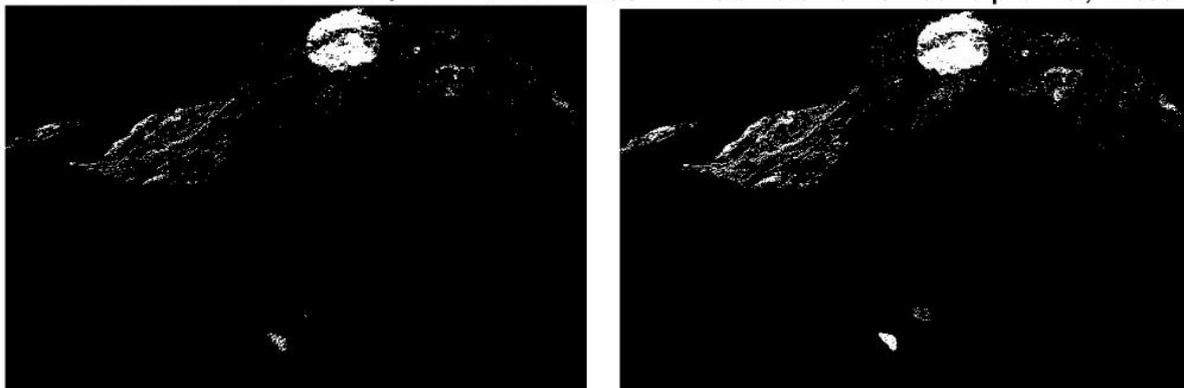
RISULTATI alpha 5%

Soglie definite dal livello di significatività alpha	-0.0998/1.0229
valori sopra soglia:	20342
% valori sopra soglia:	4.9988
mediana	0.3056
media	0.3172
sqm	0.2877
media senza code	0.3163
<u>sqm senza code</u>	<u>0.1508</u>
Skewnees - indice gamma Fisher	1.3488
Curtosi - indice gamma2 Fisher	4.114

I risultati rivelano un indice di correlazione tra i DSM pressoché unitario, ma il più basso finora calcolato. L'indice di correlazione al variare del livello di significatività del DoD, a differenza dei casi precedenti, presenta outliers significativi, indicando la necessità di livelli di significatività più elevati rispetto al 5% canonico. Inoltre dalla visualizzazione dei DN del DoD esclusi si nota che si concentrano tutti in un unico punto (figura 107), elemento per cui si necessita un'indagine più approfondita che ha evidenziato la presenza di una frana. Dissesto che non sarebbe stato possibile identificare senza l'analisi multitemporale svolta. Gli indici gamma di Fisher si discostano entrambi dal valore 0, indicando la presenza di asimmetria e dispersione nelle code della distribuzione, ulteriore conferma della necessità di escludere una porzione maggiore di DN presenti nelle code della distribuzione. La deviazione standard senza code risulta 0.1508 m, simile al caso precedente, ma comunque affetta da un errore non riconducibile al processo fotogrammetrico, come visto successivamente.

Si è quindi svolta un'analisi degli outliers per definire al meglio il livello di significatività da utilizzare e si è selezionato il 10 % per non aumentare troppo il possibile "errore di secondo tipo" riconducibile a livelli di significatività troppo elevati.

OUTLIERS differenza DSM con alpha: 10 ; 9.9921% OUTLIERS differenza DSM con alpha: 15 ; 14.9937%



OUTLIERS differenza DSM con alpha: 20 ; 19.9957%

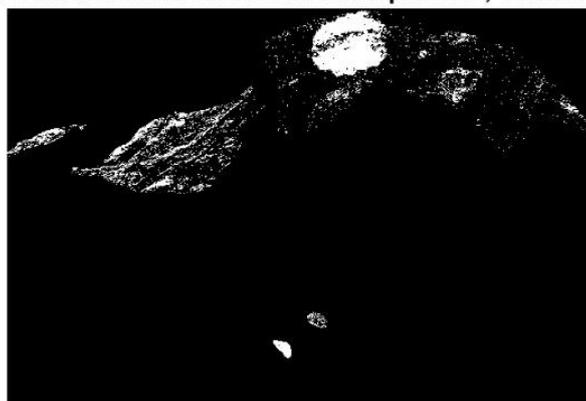


Figura 108: Pixels esclusi al variare di alpha (10,15,20) e rispettiva percentuale rispetto al numero totale.

2023-2024, alpha 10%

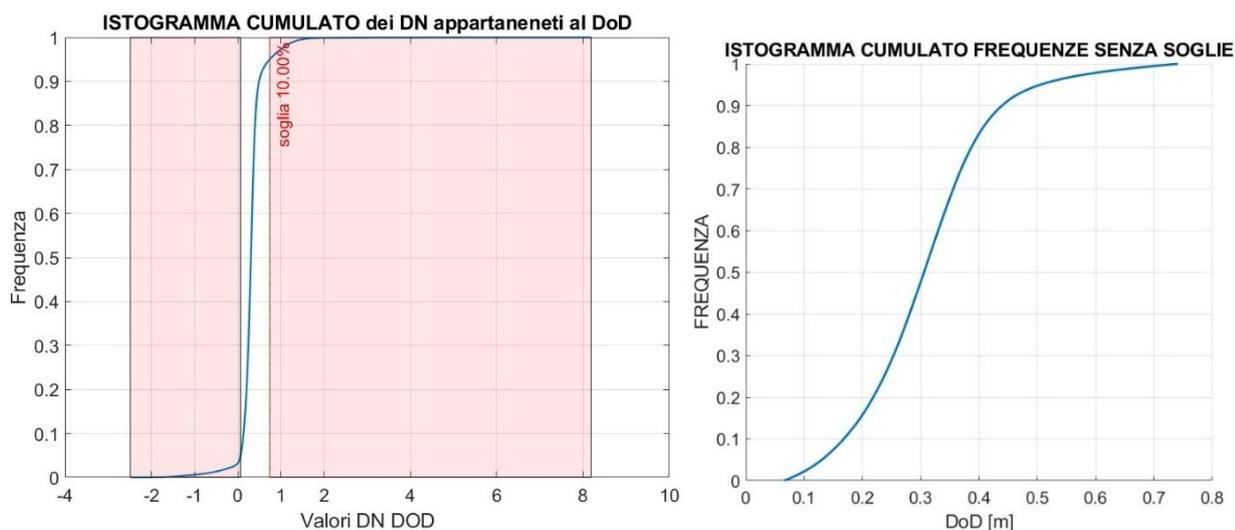


Figura 109 : Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code

RISULTATI alpha 10%

Soglie definite dal livello di significatività alpha	0.0659/0.7409
valori sopra soglia:	40661
% valori sopra soglia:	9.9920
mediana 0.3056 media 0.3172 sqm 0.2877	
media senza code	0.3092
<u>sqm senza code</u>	<u>0.1126</u>
Skewnees - indice gamma Fisher	0.6149
Curtosi - indice gamma2 Fisher	1.1420

Imponendo un alpha pari al 10% si nota un miglioramento della deviazione standard che risulta 0.1126 m e un Lod (95%) di 0.2252m, con soglie più simili ai casi precedenti. Inoltre i valori degli indici gamma di Fisher risultano più prossimi allo zero (Skewnees 0.61, Curtosi 1,142), indice di un miglioramento della distribuzione empirica del campione.

Per comprendere meglio il fenomeno di variabilità puntuale di cui è soggetto il DoD si è svolta un'analisi foto-interpretativa con il software QGIS, che ha rivelato la presenza di una **frana di tipologia planare-mista** nei depositi di falda al di sotto del ghiacciaio. Inoltre dall'analisi dei profili e delle ortofoto si notano tension crack sulla sommità e un piano di scivolamento non abbastanza profondo perché sia uno scivolamento rotazionale. Data la presenza di affioramenti del bedrock circostanti si presuppone che il piano di scivolamento sia il limite geologico tra il deposito e il complesso geologico sottostante.

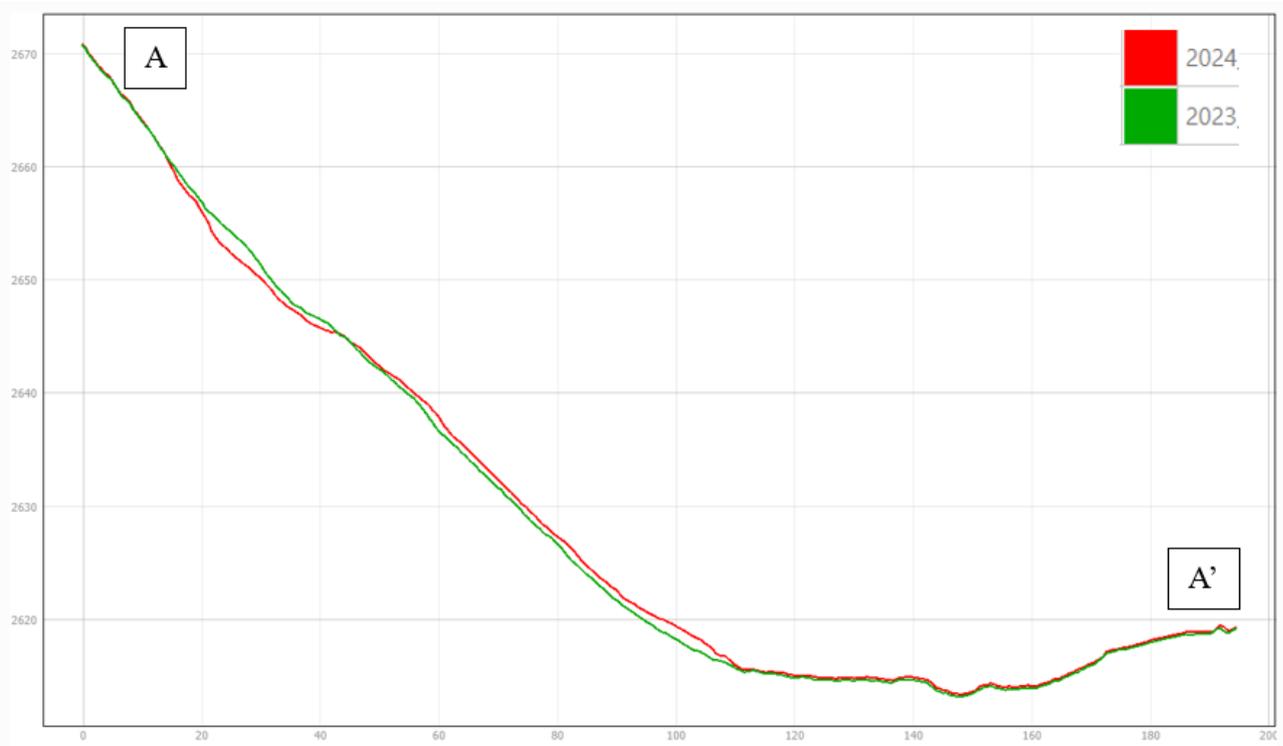
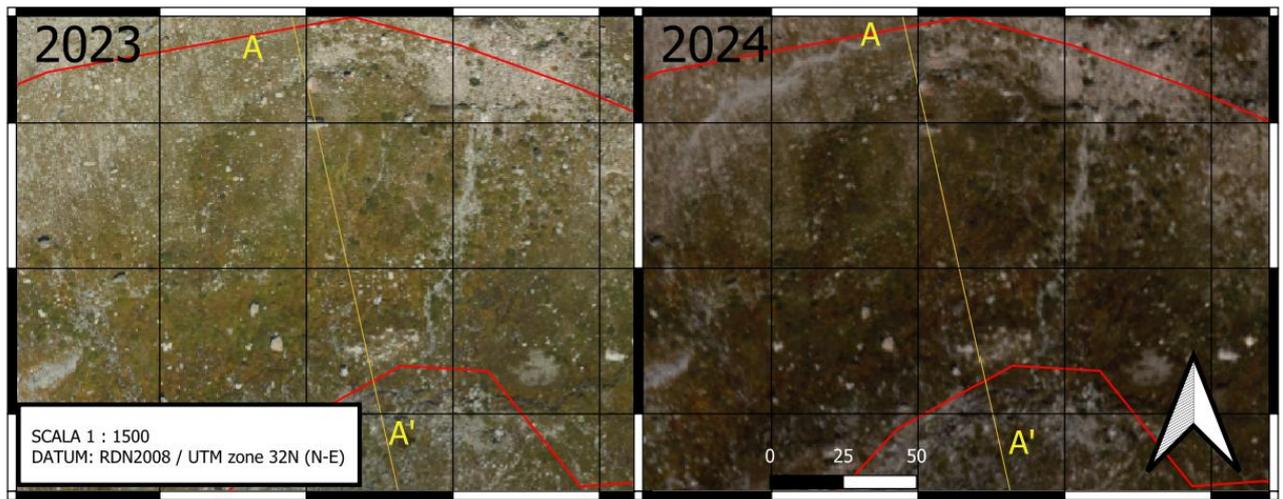


Figura 110 Ortofoto della frana di scivolamento planare con rappresentazione del profilo e dimensioni

5.4.4. Analisi dell'indice di correlazione tra i DSMs delle aree stabili lontane dai GCPs e analisi statistica dei DoDs

Con l'obiettivo di comprendere se anche le zone stabili lontane dai punti d'appoggio a terra sono soggette ad un aumento significativo degli errori si è svolto lo stesso processo statistico applicato alle aree nei pressi dei GCPs (figura 98).

2020-2021

Indice di correlazione : 0.9999731

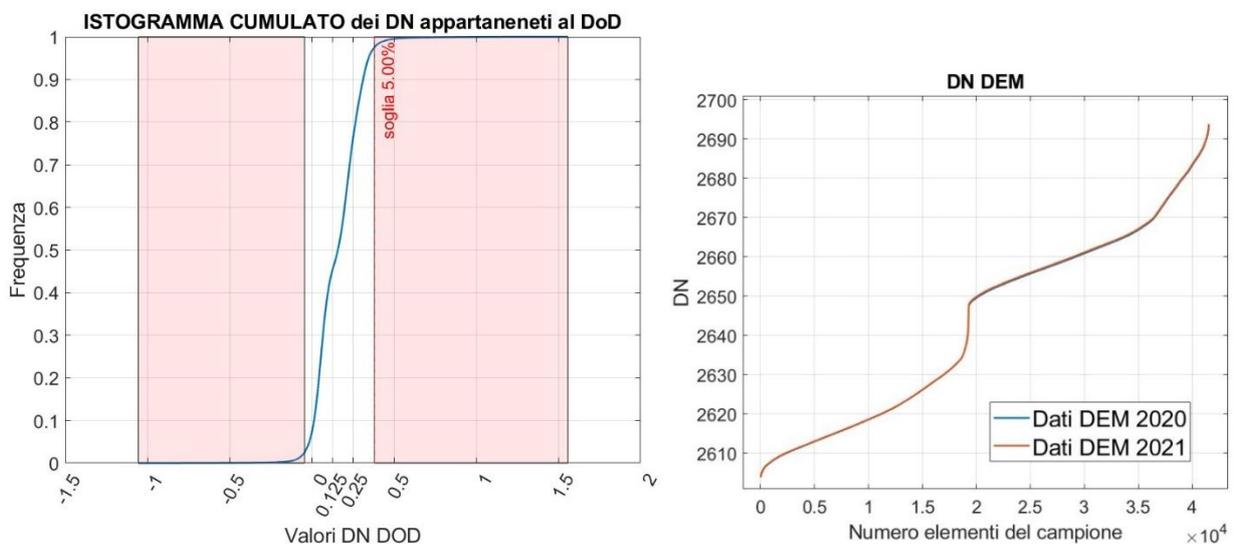


Figura 111 Figura sinistra: Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2020 2021
Figura destra: DN appartenenti ai DSMs 2020-2021

RISULTATI alpha 5%

Soglie definite dal livello di significatività alpha	-0.0434/0.3813
valori sopra soglia:	2067
% valori sopra soglia:	4.9762
mediana 0.1591 media 0.1565 sqm 0.1255	
media senza code	0.1553
<u>sqm senza code</u>	<u>0.1070</u>
Skewnees - indice gamma Fisher	0.1251
Curtosi-indice gamma2 Fisher	-1.174

I risultati rivelano un indice di correlazione tra i DSM pressoché unitario. L'indice di correlazione al variare del livello di significatività del DoD non denota la presenza di un numero elevato di

outliers. L'indice gamma di Fisher, indice di asimmetria, mostra una maggiore simmetria rispetto ai casi precedentemente analizzati, inoltre l'indice Curtosi rivela una minore presenza di outliers. La deviazione standard senza code risulta 0.1070 m, con un LoD (95%) di 0.214 m minore dei casi precedentemente analizzati vicini ai GCPs.

2021- 2022

Indice di correlazione: 0.9999763

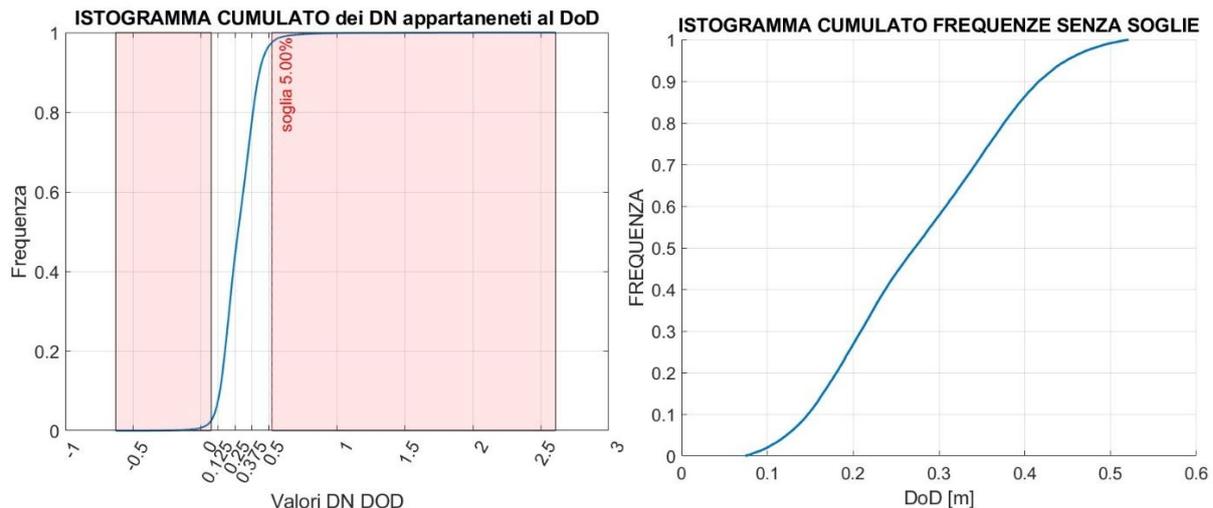


Figura 112: Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2021-2022

RISULTATI 5%

Soglie definite dal livello di significatività alpha	0.0742/0.5209
valori sopra soglia:	2068
% valori sopra soglia:	4.9820
mediana	0.2717
media	0.2808
sqm	0.1305
media senza code	0.2780
<u>sqm senza code</u>	<u>0.1021</u>
Skewnees - indice gamma Fisher	0.1664
Curtosi - indice gamma2 Fisher	-0.87806

I risultati rivelano un indice di correlazione tra i DSM pressoché unitario. L'indice di correlazione al variare del livello di significatività del DoD non indica la presenza di un numero elevato di outliers. L'indice Skewnees indica una maggiore simmetria rispetto ai casi precedentemente analizzati, inoltre l'indice Curtosi indica una minore presenza di outliers. La deviazione standard senza code risulta 0.1021 m, con un LoD (95%) di 0.2042 m maggiore del caso precedentemente analizzato vicino ai GCPs.

2022-2023

Indice di correlazione : 0.9999761

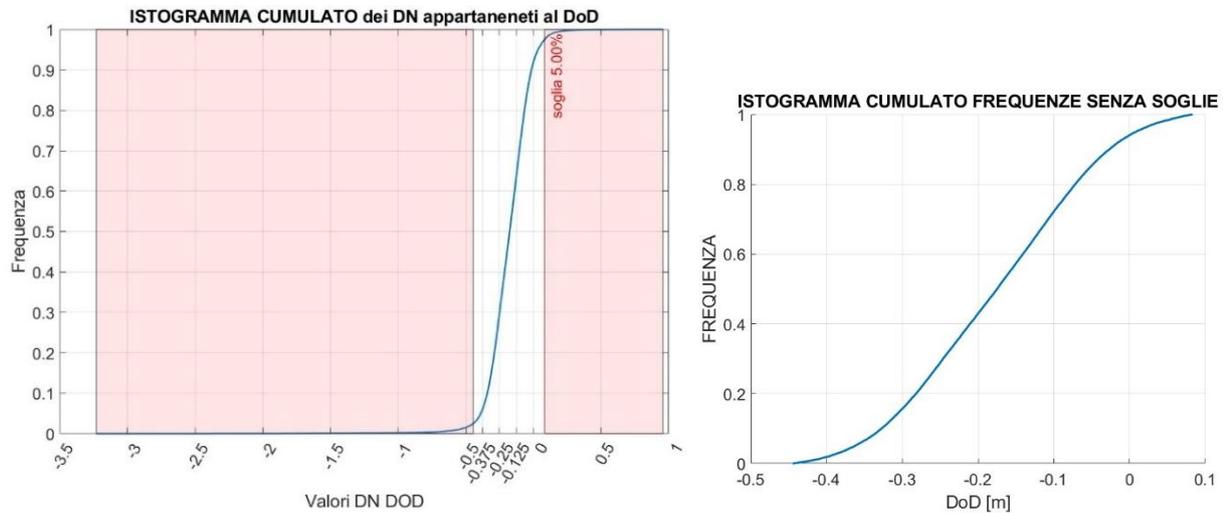


Figura 113: Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2021-2022

RISULTATI alpha 5%

Soglie definite dal livello di significatività alpha	-0.4448/0.08300
valori sopra soglia:	2055
% valori sopra soglia:	4.986
mediana -0.1748 media -0.1794 sqm	0.1503
media senza code	-0.1766
<u>sqm popolazione senza code</u>	<u>0.1137</u>
Skewnees - indice gamma Fisher	-0.02069
Curtosi - indice gamma2 Fisher	-0.7172

I risultati rivelano un indice di correlazione tra i DSM pressoché unitario. L'indice di correlazione al variare del livello di significatività del DoD non indica la presenza di un numero elevato di outliers. L'indice Skewnees indica una maggiore simmetria rispetto ai casi precedentemente analizzati, inoltre l'indice Curtosi indica una minore presenza di outliers. La deviazione standard senza code risulta 0.1137 m, con un LoD (95%) di 0.2274 m minore dei casi precedentemente analizzati vicini ai GCPs.

2023-2024

Indice di correlazione 0.9999756

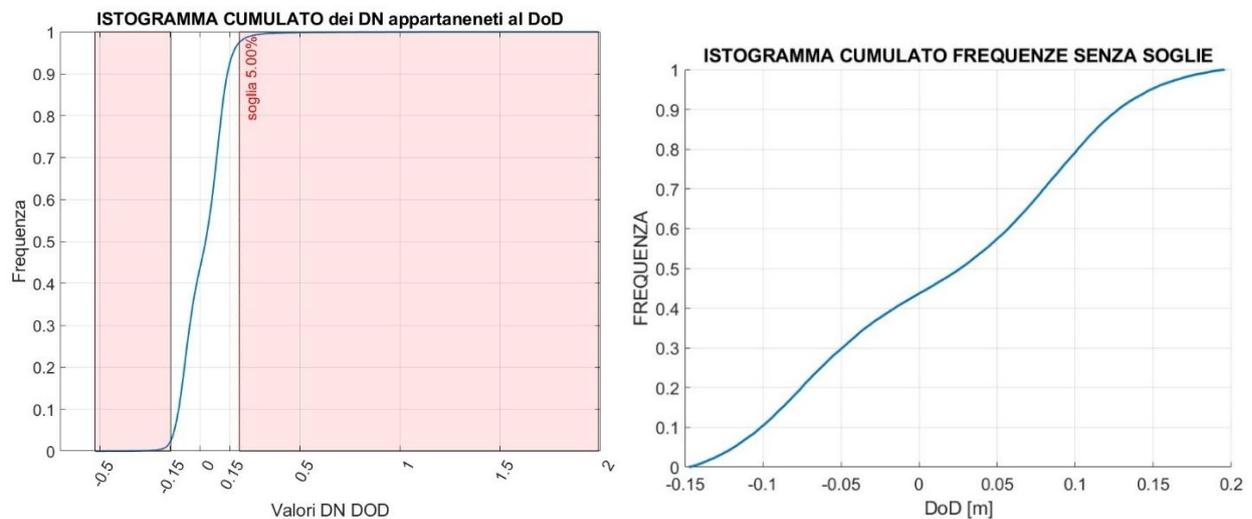


Figura 114 Curva di frequenza cumulata del DoD con rappresentazione del livello di significatività alpha ed esclusione delle code 2023-2024

RISULTATI alpha 5%

Soglie definite dal livello di significatività
alpha -0.1474/0.19555
valori sopra soglia: 2061
% valori sopra soglia: 4.9665
mediana 0.0263 media 0.01862 sqm 0.1026
media senza code 0.0169
sqm senza code 0.0874
Skewnees - indice gamma Fisher -0.0553
Curtosi - indice gamma2 Fisher -1.1967

I risultati rivelano un indice di correlazione tra i DSM pressoché unitario. L'indice di correlazione al variare del livello di significatività del DoD non indica la presenza di un numero elevato di outliers. L'indice Skewnees indica una maggiore simmetria rispetto ai casi precedentemente analizzati, inoltre l'indice Curtosi indica una minore presenza di outliers. La deviazione standard senza code risulta 0.0874 m, con un LoD (95%) di 0.1748m minore dei casi precedentemente analizzati vicini ai GCPs.

5.4.5. Confronto dei risultati

Sono stati raggruppati i risultati delle due analisi (Area vicino ai GCPs e Area lontana dai GCPs) con le varie soglie minime e massime calcolate ponendo un livello di significatività pari al 5 % e considerando quindi un intervallo di probabilità del 95 % (2σ):

Area vicino ai GCP	2020 -2021	2021 - 2022	2022 - 2023	2023 - 2024
Indice correlazione	0.9999953	0.9999968	0.9999954	0.9999937
Soglia min [m]	-0.2556	-0.2204	-0.6757	0.0659
Soglia max [m]	0.3995	0.2053	0.1049	0.7409
Media senza code [m]	-0.05109	-0.0571	-0.1802	0.3092
Sqm senza code [m]	0.1137	0.0836	0.1552	0.1126
Ind. Fisher Skewnees	0.854	0.4938	-0.6002	0.6149
Ind. Fisher Curtosi	0.5142	-0.1279	0.1284	1.142

Tabella 2: Risultati dell'analisi statistica dell'area vicino ai GCPs

Area lontana dai GCP	2020 -2021	2021 - 2022	2022 - 2023	2023 - 2024
Indice correlazione	0.9999731	0.9999763	0.9999761	0.9999756
Soglia min [m]	-0.0434	0.0742	-0.448	-0.1474
Soglia max [m]	0.3813	0.5209	0.083	0.19555
Media senza code [m]	0.1553	0.278	-0.1766	0.0169
Sqm senza code [m]	0.107	0.1021	0.1137	0.0874
Ind. Fisher Skewnees	0.1251	0.1664	-0.02069	-0.0553
Ind. Fisher Curtosi	-1.174	-0.878	-0.7172	-1.1967

Tabella 3: Risultati dell'analisi statistica dell'area lontane dai GCPs

Confrontando i risultati si può notare che gli indici di correlazione dei DSMs senza l'imposizione di soglie tendono all'unità più è alto il numero di elementi presenti all'interno del campione. Infatti risultano maggiori nel caso dell'area vicina ai GCPs 2023-2024 pur sapendo dell'esistenza della frana di cui è soggetto il rilievo 2024.

Gli scarti quadratici medi risultano simili tra le diverse aree vicine e lontane dai punti di appoggio a terra, anche se allontanandosi dai GCP dovrebbe diminuire l'accuratezza del modello. Inoltre si nota che le distribuzioni delle aree lontane rappresentano molto di più il caso normale rispetto a quelle vicine ai GCPs, come indicato dagli indici di Fisher.

5.4.6. Script 2: Analisi statistica DoD

Per l'analisi statistica si è utilizzato il software Matlab. Il workflow dello script è studiato affinché l'utente possa confermare le scelte di input dei dati, e nel caso non sia soddisfatto dei risultati, possa ripetere i passaggi intermedi di analisi modificando le impostazioni introdotte.

Lo script è suddivisibile in diverse sezioni:

- 1- Per l'implementazione dei DSMs si è utilizzata la funzione "imread" che permette di trasformare il file Raster in una matrice composta dallo stesso numero di elementi del file .tiff. Si potrebbe anche utilizzare la funzione "geotiffread" che svolge la stessa funzione di "imread" ma salva anche un'ulteriore variabile con all'interno i metadati del file caricato.
- 2- Si visualizzano i due campioni composti dai DSMs comprendendone il numero di pixels.
- 3- Calcola il DoD (differenza tra DSMs) considerando che lungo il perimetro dei DSMs è possibile che non ci sia una completa sovrapposizione tra i pixel dell'area in analisi. Durante i processi di estrapolazione da QGis potrebbe essere che lungo il perimetro del file vettoriale alcuni pixels assumono valori di NaN (espressi come negativi) e altri prendono il valore del DN effettivo. Nel calcolo della differenza il DoD assume un valore diverso da NaN se in entrambi i DSMs il DN non è un NaN.
- 4- Estrapola e ordina i campioni statistici dai DSMs e svolge un'analisi statistica. Si calcolano medie, standard deviation e indice di correlazione senza l'applicazione di soglie.
- 5- Calcola l'indice di correlazione dei DSMs al variare del livello di significatività alpha
- 6- Svolge l'analisi statistica del DoD, calcolandone mediana, media e s.q.m.. Successivamente si visualizza con le possibili soglie da imporre al variare del livello di significatività.
- 7- Applica il livello di significatività richiesto dall'utente, dando la possibilità di imporlo non simmetricamente sulle code della distribuzione. Si consiglia comunque di mantenere la simmetria secondo i metodi statistici canonici utilizzati dalla topografia classica.
- 8- Graficizza l'istogramma cumulato con le soglie imposte e la posizione dei pixel esclusi.
- 9- Svolge l'analisi statistica della distribuzione senza code e la visualizza.
- 10- Visualizzazione dei risultati ottenuti.

5.4.7. Calcolo della precisione e LoD (Limit of detection) dei DSMs e dei DoD mediante analisi statistica

Una volta calcolata la varianza caratterizzante le differenze tra DSMs (DoD) delle aree stabili, per il principio di propagazione della varianza si può determinare le varianze dei DSMs da cui è generata la differenza.

Partendo dall'ipotesi che le aree stabili non siano variare nel corso dell'acquisizione dei vari DSMs si è deciso di non limitarsi al calcolo delle differenze tra anni consecutivi ma di svolgerlo su tutte le coppie possibili ed applicarne l'analisi statistica. Al fine di velocizzare il calcolo e la restituzione dei dati, si è costruita per ogni risultato dell'analisi una matrice che rappresenti le differenze tra DSM come nella rappresentazione sottostante.

$$\begin{bmatrix} \text{DSM2020} - \text{DSM2020} & \text{DSM2021} - \text{DSM2020} & \text{DSM2022} - \text{DSM2020} & \text{DSM2023} - \text{DSM2020} & \text{DSM2024} - \text{DSM2020} \\ 0 & \text{DSM2021} - \text{DSM2021} & \text{DSM2022} - \text{DSM2021} & \text{DSM2023} - \text{DSM2021} & \text{DSM2024} - \text{DSM2021} \\ 0 & 0 & \text{DSM2022} - \text{DSM2022} & \text{DSM2023} - \text{DSM2022} & \text{DSM2024} - \text{DSM2022} \\ 0 & 0 & 0 & \text{DSM2023} - \text{DSM2023} & \text{DSM2024} - \text{DSM2023} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \text{DSM2024} - \text{DSM2024} \end{bmatrix}$$

I cui elementi della diagonale saranno uguali a 0 :

$$\begin{bmatrix} 0 & \text{DSM2021} - \text{DSM2020} & \text{DSM2022} - \text{DSM2020} & \text{DSM2023} - \text{DSM2020} & \text{DSM2024} - \text{DSM2020} \\ 0 & 0 & \text{DSM2022} - \text{DSM2021} & \text{DSM2023} - \text{DSM2021} & \text{DSM2024} - \text{DSM2021} \\ 0 & 0 & 0 & \text{DSM2023} - \text{DSM2022} & \text{DSM2024} - \text{DSM2022} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \text{DSM2024} - \text{DSM2023} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Successivamente si è applicato un duplice approccio:

- Approccio 1

Il primo approccio, ed unico nel caso dell'esistenza di soli due DSM, è di considerare la varianza di entrambi i DSMs come identica. Con alla base l'assunzione che entrambi i prodotti cartografici siano nuvole di punti orientate con gli stessi GCP, prodotte con lo stesso software, con la stessa strumentazione e camera.

Per cui:

$$\sigma_{(\text{DSM2}-\text{DSM1})}^2 = \sigma_{\text{DSM1}}^2 + \sigma_{\text{DSM2}}^2 = 2\sigma_{\text{DSMaereo}}^2 \rightarrow \sigma_{\text{DSMaereo}} = \sqrt{\frac{\sigma_{(\text{DSM1}-\text{DSM2})}^2}{2}}$$

Quindi applicato il principio di propagazione della varianza alla matrice rappresentante le varianze delle differenze tra DSM:

$$\begin{bmatrix} 0 & \sigma^2(\text{DoD } 2021 - 2020) & \sigma^2(\text{DoD } 2022 - 2020) & \sigma^2(\text{DoD } 2023 - 2020) & \sigma^2(\text{DoD } 2024 - 2020) \\ 0 & 0 & \sigma^2(\text{DoD } 2022 - 2021) & \sigma^2(\text{DoD } 2023 - 2021) & \sigma^2(\text{DoD } 2024 - 2021) \\ 0 & 0 & 0 & \sigma^2(\text{DoD } 2024 - 2021) & \sigma^2(\text{DoD } 2024 - 2022) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma^2(\text{DoD } 2024 - 2023) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Segue il risultato nella stessa forma matriciale:

σ DSMs	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	0.080	0.120	0.076	0.102
2021	0	0	0.059	0.062	0.067
2022	0	0	0	0.110	0.106
2023	0	0	0	0	0.0800
Media	0.094	0.067	0.099	0.082	0.0889

LoD (95%) <u>DSMs</u>	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	0.161	0.240	0.152	0.204
2021	0	0	0.118	0.125	0.135
2022	0	0	0	0.219	0.212
2023	0	0	0	0	0.160
Media	0.189	0.135	0.197	0.164	0.178

Tabella 4: S_{qm} e LoD (95%) dei DSMs

Nell'ultima riga di entrambe le tabelle è stata calcolata la media dei diversi valori di σ e LoD (95%) riconducibili ad ogni anno considerando le differenti coppie di DoD calcolate, dato che con questo metodo risultano 4 valori di σ e LoD per ogni DSM.

In media si può dire che i DSMs hanno un LoD (95%) che varia tra i 13 cm e i 19 cm.

Di seguito i risultati dell'analisi statistica completa per tutte le coppie di DSMs:

sqm DoD	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	0.114	0.170	0.108	0.145
2021	0	0	0.084	0.089	0.095
2022	0	0	0	0.155	0.150
2023	0	0	0	0	0.113
Media	0.134	0.095	0.140	0.116	0.125

Tabella 5: Sqm dei DoDs calcolati per ogni possibile coppia di DSM

LoD (95%) DoDs	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	0.227	0.340	0.215	0.289
2021	0	0	0.167	0.177	0.190
2022	0	0	0	0.311	0.299
2023	0	0	0	0	0.226
Media	0.268	0.190	0.280	0.232	0.251

Tabella 6: Lod (95%) dei DoDs calcolati per ogni possibile coppia di DSM

media DoDs	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	0.051	0.110	0.290	-0.026
2021	0	0	0.057	0.238	-0.071
2022	0	0	0	0.179	-0.130
2023	0	0	0	0	-0.308
Media	0.106	0.069	0.054	-0.308	-0.134

Tabella 7: Media dei DoDs calcolati per ogni possibile coppia di DSM

Skewnees	2020	2021	2022	2023	2024
2020	NaN	-0.851	-0.838	-0.410	-0.793
2021	0	NaN	-0.489	0.434	-0.553
2022	0	0	NaN	0.605	-0.028
2023	0	0	0	NaN	-0.589
Media	-0.723	-0.365	-0.187	0.010	-0.491

Tabella 8 Tab.4.7: Indice di Skewnees dei DoDs calcolati per ogni possibile coppia di DSM

Curtosi	2020	2021	2022	2023	2024
2020	NaN	0.514	0.500	-0.297	0.766
2021	0	NaN	-0.134	-0.267	0.098
2022	0	0	NaN	-0.134	-0.655
2023	0	0	0	NaN	1.110
Media	0.371	0.0528	-0.106	-0.338	0.330

Tabella 9: Indice di Curtosi dei DoDs calcolati per ogni possibile coppia di DSM

- Approccio 2

Il secondo metodo applicabile si basa sulla stima ai minimi quadrati sfruttando la possibilità di non dover ipotizzare la stessa varianza dei DSMs e permettendo così di apprezzarne maggiormente le differenze. Il problema non è più con il numero di equazioni pari al numero di incognite, come nell'approccio 1, ma con un numero maggiore di equazioni rispetto alle variabili casuali da determinare.

È necessario avere almeno 4 DSMs della stessa area, altrimenti non si ha la condizione di avere più equazioni che incognite. 3 DSMs creano 3 equazioni a 3 incognite, 4 DSMs creano 6 equazioni a 4 incognite, 5 DSMs creano 10 equazioni a 5 incognite.

Questo permette di introdurre una variabilità tra la varianza dei vari DSM e apprezzarne le differenze dalle varie coppie generabili.

Sono state esplicitate tutte le equazioni ed incognite del problema, si è costruita la matrice immagine, è stata posta una matrice dei pesi pari alla matrice identità e si sono così calcolate le incognite stimate con il metodo dei minimi quadrati.

Per lo scarto quadratico medio dei DSMs il processo dei minimi quadrati è stato svolto con le varianze e con l'applicazione del principio di propagazione, successivamente ridimensionate a σ ; per la media si è sfruttato il secondo corollario del teorema della media per cui la media della differenza di due variabili è la differenza delle medie delle due.

Per cui per il principio di propagazione della varianza e la stima ai minimi quadrati è possibile scrivere:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{(DSM2021-DSM2020)}^2 = \sigma_{DSM2021}^2 + \sigma_{DSM2020}^2 \\ \sigma_{(DSM2022-DSM2020)}^2 = \sigma_{DSM2022}^2 + \sigma_{DSM2020}^2 \\ \sigma_{(DSM2022-DSM2021)}^2 = \sigma_{DSM2022}^2 + \sigma_{DSM2021}^2 \\ \sigma_{(DSM2023-DSM2020)}^2 = \sigma_{DSM2023}^2 + \sigma_{DSM2020}^2 \\ \sigma_{(DSM2023-DSM2021)}^2 = \sigma_{DSM2023}^2 + \sigma_{DSM2021}^2 \\ \sigma_{(DSM2023-DSM2022)}^2 = \sigma_{DSM2023}^2 + \sigma_{DSM2022}^2 \\ \sigma_{(DSM2024-DSM2020)}^2 = \sigma_{DSM2024}^2 + \sigma_{DSM2020}^2 \\ \sigma_{(DSM2024-DSM2021)}^2 = \sigma_{DSM2024}^2 + \sigma_{DSM2021}^2 \\ \sigma_{(DSM2024-DSM2022)}^2 = \sigma_{DSM2024}^2 + \sigma_{DSM2022}^2 \\ \sigma_{(DSM2024-DSM2023)}^2 = \sigma_{DSM2024}^2 + \sigma_{DSM2023}^2 \end{array} \right.$$

da cui in forma matriciale $AX - lo = v$:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{DSM2020}^2 \\ \sigma_{DSM2021}^2 \\ \sigma_{DSM2022}^2 \\ \sigma_{DSM2023}^2 \\ \sigma_{DSM2024}^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sigma_{(DSM2021-DSM2020)}^2 \\ \sigma_{(DSM2022-DSM2020)}^2 \\ \sigma_{(DSM2022-DSM2021)}^2 \\ \sigma_{(DSM2023-DSM2020)}^2 \\ \sigma_{(DSM2023-DSM2021)}^2 \\ \sigma_{(DSM2023-DSM2022)}^2 \\ \sigma_{(DSM2024-DSM2020)}^2 \\ \sigma_{(DSM2024-DSM2021)}^2 \\ \sigma_{(DSM2024-DSM2022)}^2 \\ \sigma_{(DSM2024-DSM2023)}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_8 \\ v_9 \\ v_{10} \end{bmatrix}$$

per cui: $\hat{X} = N^{-1}T_N$ dove $N = A^T P A$, $T_n = A^T P l o$ e $P = I$ matrice identità.

Il vettore incognita delle varianze tramutato a scarto quadratico medio σ_{DSM} , dove $\sigma_{DSM} = \sqrt{\sigma_{DSM}^2}$, risulta:

σ_{DSM}	
2020	0.108
2021	0.030
2022	0.120
2023	0.075
2024	0.093

Tabella 10: sqm DSM

Da cui si può definire un LoD (95%):

LoD (95%)	
2020	0.216
2021	0.059
2022	0.240
2023	0.150
2024	0.186

Tabella 11: LoD 95% DSM

Per il primo corollario del teorema della media data la linearità delle equazioni si può esplicitare il sistema di equazioni tale che:

$$\begin{cases} \mu_{(DSM2021-DSM2020)} = \mu_{DSM2021} - \mu_{DSM2020} \\ \mu_{(DSM2022-DSM2020)} = \mu_{DSM2022} - \mu_{DSM2020} \\ \mu_{(DSM2022-DSM2021)} = \mu_{DSM2022} - \mu_{DSM2021} \\ \mu_{(DSM2023-DSM2020)} = \mu_{DSM2023} - \mu_{DSM2020} \\ \mu_{(DSM2023-DSM2021)} = \mu_{DSM2023} - \mu_{DSM2021} \\ \mu_{(DSM2023-DSM2022)} = \mu_{DSM2023} - \mu_{DSM2022} \\ \mu_{(DSM2024-DSM2020)} = \mu_{DSM2024} - \mu_{DSM2020} \\ \mu_{(DSM2024-DSM2021)} = \mu_{DSM2024} - \mu_{DSM2021} \\ \mu_{(DSM2024-DSM2022)} = \mu_{DSM2024} - \mu_{DSM2022} \\ \mu_{(DSM2024-DSM2023)} = \mu_{DSM2024} - \mu_{DSM2023} \end{cases}$$

Dove μ è il valore medio.

In forma matriciale $AX - lo = v$:

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{DSM2020} \\ \mu_{DSM2021} \\ \mu_{DSM2022} \\ \mu_{DSM2023} \\ \mu_{DSM2024} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mu_{(DSM2021-DSM2020)} \\ \mu_{(DSM2022-DSM2020)} \\ \mu_{(DSM2022-DSM2021)} \\ \mu_{(DSM2023-DSM2020)} \\ \mu_{(DSM2023-DSM2021)} \\ \mu_{(DSM2023-DSM2022)} \\ \mu_{(DSM2024-DSM2020)} \\ \mu_{(DSM2024-DSM2021)} \\ \mu_{(DSM2024-DSM2022)} \\ \mu_{(DSM2024-DSM2023)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \\ v_6 \\ v_7 \\ v_8 \\ v_9 \\ v_{10} \end{bmatrix}$$

per cui: $\hat{X} = N^{-1}T_N$ dove $N = A^T P A$, $T_n = A^T P l o$ e $P = I$ matrice identità.

Il vettore incognita delle medie μ_{DSM} risulta:

μ_{DSM}	
2020	-0.08488
2021	-0.03464
2022	0.023479
2023	0.203244
2024	-0.1072

Tabella 12: Media DSM rispetto DoD

I risultati appena esposti appartengono alle aree collocate nelle vicinanze dei GCPs, nelle tabelle successive è possibile vedere il confronto con le aree lontane dai GCPs:

- Soluzioni ponendo l'ipotesi di stessa precisione tra i DSMs (Approccio 1):

sqm DEMs	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	0.08034191	0.1200732	0.076118	0.102207
2021	0	0	0.0590821	0.0625876	0.067337
2022	0	0	0	0.1098072	0.105999
2023	0	0	0	0	0.079963
Media	0.0946851	0.06733702	0.0987403	0.082119	0.088877

LoD (95%) DEMs	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	0.16068381	0.2401463	0.1522359	0.204415
2021	0	0	0.1181641	0.1251752	0.134673
2022	0	0	0	0.2196143	0.211998
2023	0	0	0	0	0.159927
Media	0.1893702	0.13467405	0.1974806	0.164238	0.177753

sqm DoD	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	0.11362061	0.1698091	0.1076471	0.144543
2021	0	0	0.0835547	0.0885122	0.095228
2022	0	0	0	0.1552908	0.149905
2023	0	0	0	0	0.113085
Media	0.133905	0.09522893	0.1396399	0.1161338	0.12569

LoD (95%) DoDs	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	0.22724123	0.3396182	0.2152941	0.289086
2021	0	0	0.1671093	0.1770245	0.190456
2022	0	0	0	0.3105816	0.29981
2023	0	0	0	0	0.22617
Media	0.26781	0.19045786	0.2792797	0.2322676	0.251381

media DoDs	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	0.05100591	0.1095521	0.2900664	-0.02622
2021	0	0	0.0570241	0.2382494	-0.07107
2022	0	0	0	0.1794144	-0.13023
2023	0	0	0	0	-0.30849
Media	0.1061013	0.06880112	0.0539394	-0.3084878	-0.134

Skewnees	2020	2021	2022	2023	2024
2020	NaN	-0.8515916	-0.838072	-0.4101527	-0.79336
2021	0	NaN	-0.4887116	0.4340737	-0.55324
2022	0	0	NaN	0.6051124	-0.02832
2023	0	0	0	NaN	-0.58951
Media	-0.723293	-0.3648668	-0.1874983	0.0098818	-0.49111

Curtosi	2020	2021	2022	2023	2024
2020	NaN	0.51409208	0.5000106	-0.297072	0.76561
2021	0	NaN	-0.1339079	-0.2668955	0.097852
2022	0	0	NaN	-0.1343238	-0.65492
2023	0	0	0	NaN	1.109762
Media	0.3706602	0.05278506	-0.1057857	-0.3383032	0.329575

sqm DEMs	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	0.075907	0.127605	0.098617	0.146399
2021	0	0	0.073007	0.038405	0.074035
2022	0	0	0	0.081149	0.060951
2023	0	0	0	0	0.061552
Media	0.112132	0.065338	0.085678	0.069931	0.085734

LoD (95%) DEMs	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	0.151814	0.255209	0.197235	0.292797
2021	0	0	0.146014	0.076809	0.148069
2022	0	0	0	0.162299	0.121902
2023	0	0	0	0	0.123104
Media	0.224264	0.130677	0.171356	0.139862	0.171468

sqm DoD	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	0.107349	0.18046	0.139466	0.207039
2021	0	0	0.103248	0.054312	0.104701
2022	0	0	0	0.114762	0.086198
2023	0	0	0	0	0.087048
Media	0.158578	0.092402	0.121167	0.098897	0.121246

LoD (95%) DoDs	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	0.214698	0.36092	0.278932	0.414078
2021	0	0	0.206495	0.108625	0.209401
2022	0	0	0	0.229525	0.172395
2023	0	0	0	0	0.174095
Media	0.317157	0.184805	0.242334	0.197794	0.242493

media DoDs	2020	2021	2022	2023	2024
2020	0	-0.15433	-0.43111	-0.2538	-0.27028
2021	0	0	-0.27647	-0.10077	-0.11817
2022	0	0	0	0.173879	0.162358
2023	0	0	0	0	-0.01673
Media	-0.27738	-0.16243	-0.09284	-0.01673	-0.06071

Skewnees	2020	2021	2022	2023	2024
2020	NaN	-0.13086	0.05505	-0.3697	-0.07433
2021	0	NaN	-0.14132	-0.20722	0.005924
2022	0	0	NaN	0.033319	-0.44337
2023	0	0	0	NaN	0.051908
Media	-0.12996	-0.11837	-0.12408	-0.12292	-0.11497

Curtosi	2020	2021	2022	2023	2024
2020	NaN	-1.1804	-1.33802	-0.80054	-1.51139
2021	0	NaN	-0.85676	-0.05083	-1.52466
2022	0	0	NaN	-0.76359	0.313337
2023	0	0	0	NaN	-1.18553
Media	-1.20759	-0.90316	-0.66126	-0.3254	-0.97706

Tabella 13 Tab. sinistra: Aree vicine GCP; Tab destra: Aree lontane GCP. Scarto quadratico medio, LoD e media sono espressi in metri.

- Soluzioni ponendo l'ipotesi di differente risoluzione tra i DSMs e stima con il metodo dei minimi quadrati (Approccio 2)

μ_{DoD}		μ_{DoD}	
2020	-0.08488	2020	0.221904
2021	-0.03464	2021	0.068216
2022	0.023479	2022	-0.20876
2023	0.203244	2023	-0.03279
2024	-0.1072	2024	-0.04857

σ_{DSM}		σ_{DSM}	
2020	0.107787	2020	0.149015
2021	0.02931	2021	0.035085
2022	0.119767	2022	0.089513
2023	0.075177	2023	0.033464
2024	0.092826	2024	0.098397

LoD (95%)		LoD (95%)	
2020	0.215574	2020	0.29803
2021	0.058621	2021	0.07017
2022	0.239533	2022	0.179025
2023	0.150354	2023	0.066927
2024	0.185651	2024	0.196794

Tabella 14 Tab sinistra Aree vicine GCP; Tab destra: Aree lontane GCP

Confrontando le standard deviations si può notare che in entrambi i casi i valori non variano di ordine di grandezza, potendo così affermare che la precisione è decimetrica.

Il passaggio finale è stato il calcolo del σ_{DoD} noti i σ_{DEM} stimati ai minimi quadrati, per cui riapplicando il principio di propagazione della varianza il $\sigma_{DoD} = \sqrt{\sigma_{DEM,i}^2 + \sigma_{DEM,i+1}^2}$.

σ_{DoD}		σ_{DoD}	
2020-2021	0.111701	2021-2020	0.15309
2021-2022	0.123301	2022-2021	0.096143
2022-2023	0.141406	2023-2022	0.095563
2023-2024	0.119449	2024-2023	0.103932

Tabella 15 Tab.sinistra: Aree vicine GCP; Tab destra: Aree lontane GCP

Si è successivamente calcolata anche la μ_{DoD} applicando il secondo corollario del teorema della media per cui: $\mu_{DoD} = \mu_{DEM,i+1} - \mu_{DEM,i}$

μ_{DoD}		μ_{DoD}	
2021-2020	0.050242	2021-2020	-0.15369
2022-2021	0.058118	2022-2021	-0.27698
2023-2022	0.179765	2023-2022	0.175972
2024-2023	-0.31045	2024-2023	-0.01577

Tabella 16: Tab sinistra: Aree vicine GCP; Tab destra: Aree lontane GCP

Da un confronto tra i **LoD** delle due aree si può notare che non esiste un'area maggiormente soggetta ad errori, ma è evidente un'alternanza. Valutando l'andamento nelle varie annate, in entrambe le aree le precisioni assumono valori simili e dello stesso ordine di grandezza, indice di una buona eliminazione degli errori per spostamenti sito-specifici. In conclusione si è deciso di prendere come riferimento i risultati delle aree vicine ai GCPs.

5.4.8. Indice di Stabilità

Con la finalità di confrontare le varie aree e i vari DSM si è deciso di analizzarne il **grado di stabilità** mediante il coefficiente $I_{stab} = \frac{\mu_{DoD}}{\sigma_{DoD}}$, per cui se la standard deviations è maggiore della media vuol dire che gli spostamenti presenti non sono rilevabili dal modello digitale per cui l'area è stabile, al contrario vuol dire che si è verificato uno spostamento importante per cui l'area non è definibile come stabile. In ogni caso si ricorda che i valori calcolati sono derivanti da campioni statistici a cui sono state eliminate le code delle distribuzioni, per cui già la maggior parte degli outliers non sono considerati nel calcolo.

Ind. Stabilità		Ind. Stabilità	
2020-2021	0.449793	2021-2020	-1.00391
2021-2022	0.471347	2022-2021	-2.88091
2022-2023	1.271269	2023-2022	1.841423
2023-2024	-2.59898	2024-2023	-0.15178

Tabella 17: Tab sinistra: Aree vicine GCP; Tab destra: Aree lontane GCP

Dagli indici è chiaro che i rilievi che mostrano meno differenze tra le annate risalgono al 2020-2021 e 2021-2022 per l'area vicina ai GCP, che ricorda essere soggetta ad un fenomeno gravitativo sviluppatosi tra il 2023 e il 2024. Per l'area lontana dai GCP le annate che si discostano meno sono il 2021-2020 e il 2023-2024.

4.4.9 Script 3: Algoritmo per il calcolo del LoD mediante stima ai minimi quadrati

Per il calcolo della deviazione standard, Lod (95%) e media dei DSMs si è utilizzato il software Matlab. Il programma scritto è divisibile nei seguenti punti:

- 1- Il programma permette di caricare fino a 5 DSMs con la funzione “imread”
- 2- Svolge l’analisi statistica dello script 2 per ogni DoD, salvando i risultati nella matrice sopra indicata come esempio nel paragrafo 4.4.7
- 3- Calcola la deviazione standard per ogni DSM con l’ipotesi che siano uguali per ogni DoD
- 4- Calcola la deviazione standard e media per ogni DSM con la stima ai minimi quadrati ed estraendo i valori di deviazione standard dei DoD calcolati nel punto 2.
- 5- Permette la visualizzazione dei risultati ottenuti sia del punto 3 che del punto 4

5.5. Studio della variabilità altimetrica e volumetrica del ghiacciaio durante il quinquennio 2020-2024

5.5.1. Introduzione

Il monitoraggio periodico dell'estensione e dei cambiamenti di volume dei ghiacciai è uno strumento fondamentale, considerando i rilevanti cambiamenti e le perdite di volume che le masse glaciali hanno subito negli ultimi anni (Villa, et al., 2007). Per la comprensione delle variabilità si necessita di rilievi fotogrammetrici complessi ed in continuo aggiornamento. Questo processo è fondamentale per lo studio dei pericoli e dei rischi correlati ai ghiacciai nelle zone alpine, e per la conoscenza delle conseguenze del cambiamento climatico. Una volta comprese le precisioni dei prodotti cartografici del ghiacciaio si è proceduto con l'analisi delle variazioni altimetriche e volumetriche di cui è stato soggetta la massa glaciale durante il quinquennio in analisi.

5.5.2. Variabilità altimetrica e volumetrica

Per prima cosa, mediante QGIS, si è identificata l'area completa del ghiacciaio per il ritaglio dei file Raster da analizzare, composta da 30.290.775 pixels con un GSD di 0.5 m e un'area totale di circa 7.5 Km²; si è imposta una **soglia e un livello di significatività** tale da eliminare dal calcolo l'influenza dei crepacci o altri spostamenti non correlati alla fusione o accumulo del ghiacciaio (i campioni utilizzati sono soggetti ad una prima soglia di 10 m e ad una seconda soglia imposta mediante un livello di significatività del 5%). Per questo risulta importante la visualizzazione di ciò che è escluso dall'analisi (figura 115). Inoltre, nell'analisi statistica del DoD, imponendo come sola condizione un livello di significatività, è impossibile separare gli abbassamenti delle fronti con le variazioni di quota indotte dai crepacci (in figura 117 visibili come pallini nell'istogramma cumulato). Si è quindi impostata una seconda condizione, per cui il dato viene escluso non solo se locato nella coda della distribuzione, ma deve essere anche ad una quota maggiore di 2800m, isolando così l'area delle fronti con quella dei crepacci (figura 115). La quota di 2800m s.l.m. è stata definita dalla precedente analisi dei profili. Lo stesso procedimento è stato utilizzato per selezionare i pixel con cui calcolare le **variazioni volumetriche** presenti nei risultati per ogni coppia di anni, date dalla sommatoria dei prodotti della variazione di altezza del pixel e la rispettiva area.

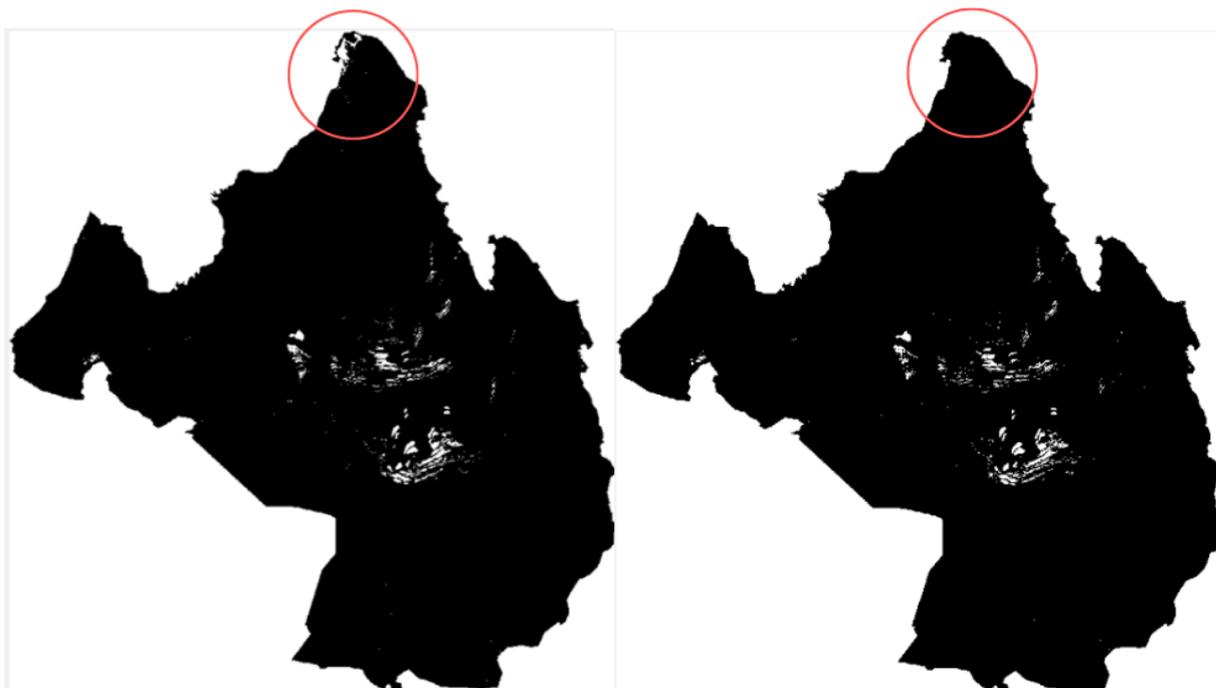


Figura 115: A sinistra i valori non inclusi nel calcolo con la sola soglia statistica, a destra i valori esclusi con le condizioni di soglia e quota che permette di escludere solo le variazioni indotte dai crepacci e non quelle delle fronti glaciali.

Si è calcolata **la media, la mediana e lo scarto quadratico medio della differenza tra DSMs (DoD)** indotte dai processi di fusione ed accumulo del ghiacciaio con e senza l'imposizione delle condizioni sopra citate, e nella seconda parte dell'analisi si è calcolata la media e scarto quadratico medio della variazione in altezza dei pixels rappresentanti la stessa quota del ghiacciaio (figura 118). Essendo già stato applicato un processo di eliminazione degli outliers sul campione iniziale di differenze tra DSM, non si è riapplicato un livello di significatività nel calcolo nella media e standard deviation per ogni quota (figura 118). Questo perché si presuppone che gli errori non siano distribuiti nelle code delle distribuzioni di ogni quota ma nella distribuzione con tutte le quote.

Successivamente si sono calcolate **le variazioni volumetriche** al variare della quota mediante il prodotto tra la differenza di altezza media del ghiacciaio per la quota e l'area del ghiacciaio a quella quota (figura 118). È quindi importante ricordare che il volume indicato è il volume medio e non quello calcolato dalla variazione altimetrica per ogni pixel e la corrispettiva area del pixel.

Si nota inoltre che le **variazioni volumetriche maggiori** al variare della quota si sono manifestate nelle quote caratterizzate da aree maggiori (corrispondenza dei picchi di variazione volumetrica in blu con i picchi di area del ghiacciaio in rosso), come il "plateau" del bacino di accumulo a 3200m s.l.m. e l'area tra il fronte ed i crepacci a 2750m s.l.m. (figura 118). Inoltre si nota che all'aumentare dell'area c'è una riduzione della deviazione standard nella differenza tra le altezze del ghiacciaio

al variare della quota, dovuta ad un aumento dei dati del campione da cui è calcolata. Le quote dei crepacci (2950-3050m s.l.m.) sono soggette ad un aumento della deviazione standard, indice di una non completa esclusione degli outliers dal dato analizzato (figura 118).

2020 2021

- Soglia 10 m; alpha 5% ; Soglie definite dal livello di significatività alpha 1.4124/ -3.0500 m Intervallo di valori compresi i dati sul fronte non soggetti a soglia -20.2285 1.4124 m
- Mediana -0.4590 m Media -0.6986 m Sqm 1.3042 m
- Media senza code -0.7472 m Sqm senza code 0.9691 m
- Indice di Fisher Skewnees -0.9031, Indice di Fisher Curtosi 1.4932
- Variazione di volume -5.5025e+06 m³

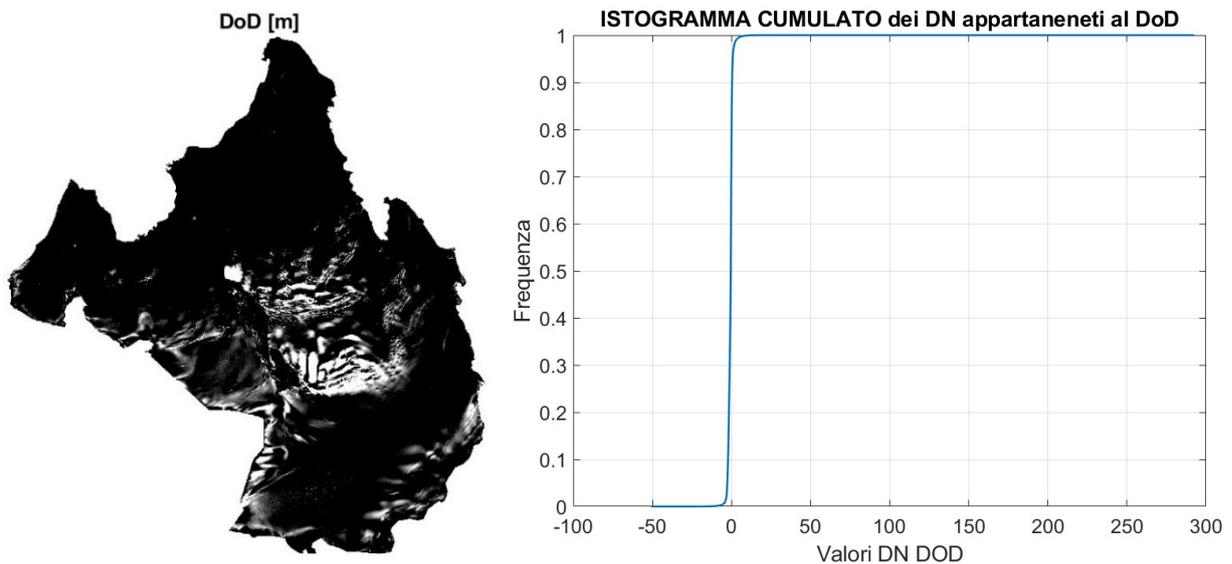


Figura 116: DoD e Curva di frequenza empirica senza l'imposizione di soglie

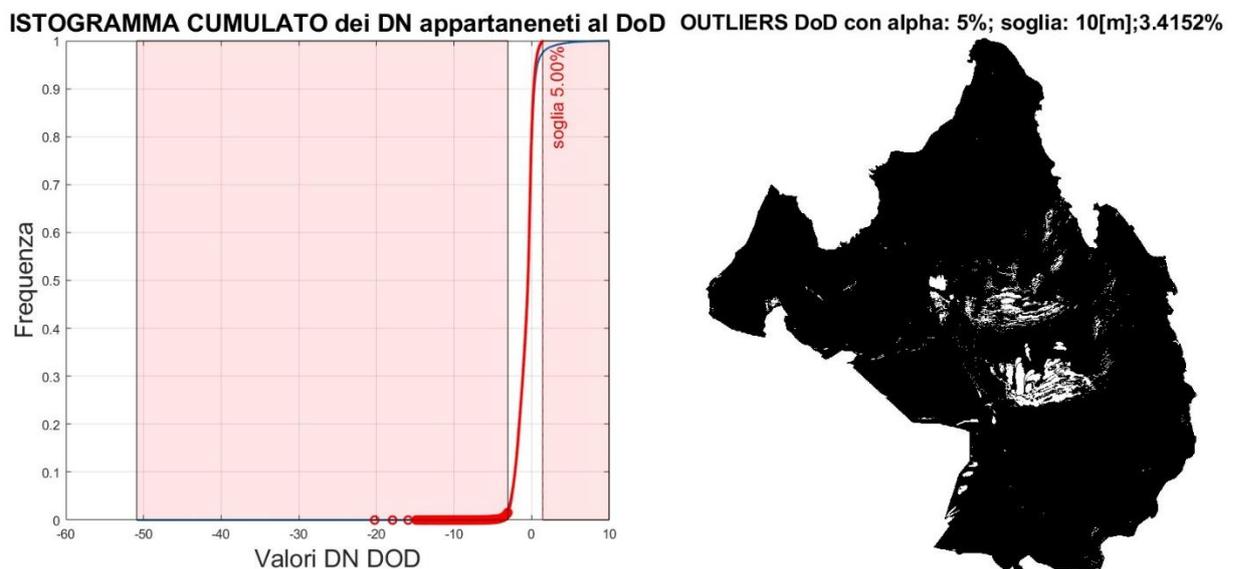


Figura 117: Curva di frequenza empirica delle variazioni di quota (DN DoD) con l'applicazione delle soglie e inclusione dei dati del fronte (cerchi rossi); In bianco su sfondo nero i pixel del DoD esclusi con l'imposizione delle soglie

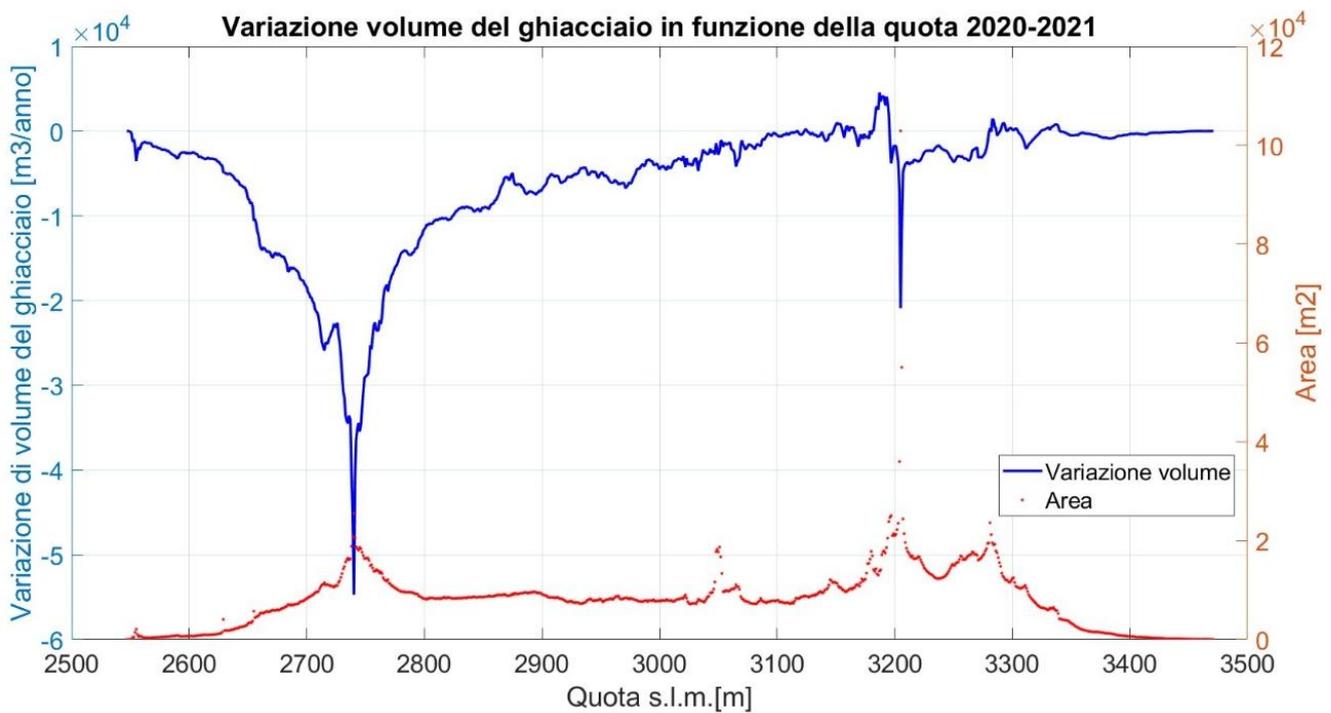
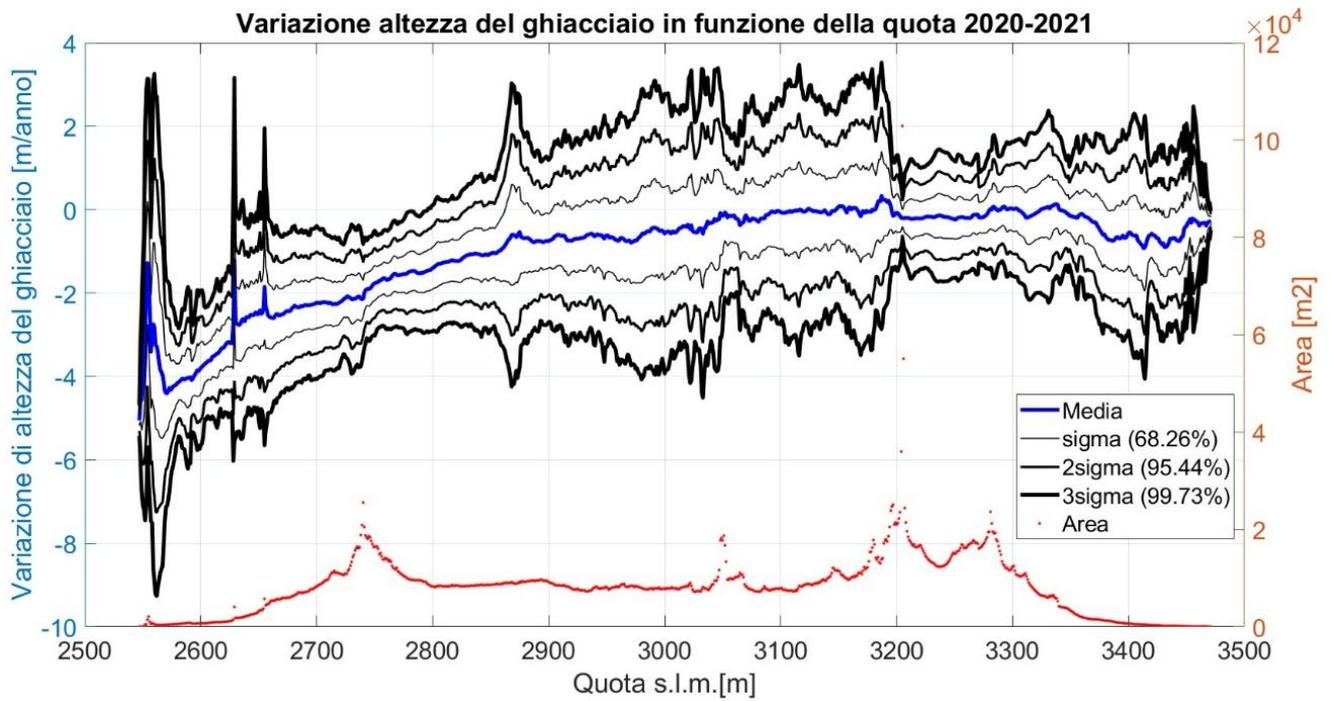


Figura 118: In blu media e deviazione standard della variazione di altezza e volume dei pixels rappresentati la stessa quota. In rosso l'area del ghiacciaio al variare della quota

2021 2022

- Soglia 10 [m]; alpha 5%; Soglie definite dal livello di significatività alpha 0 / -7.1543 Intervallo di valori compresi i dati sul fronte non soggetti a soglia -17.9436 / 0
- Mediana -3.9412 [m] Media -4.1275 [m] Sqm 1.5980 [m]
- Media senza code [m] -4.0974 Sqm senza code 1.308 [m]
- Indice di Fisher Skewnees -0.1671, Indice di Curtosi 1.8420
- Variazione di volume -3.0502e+07 [m³]

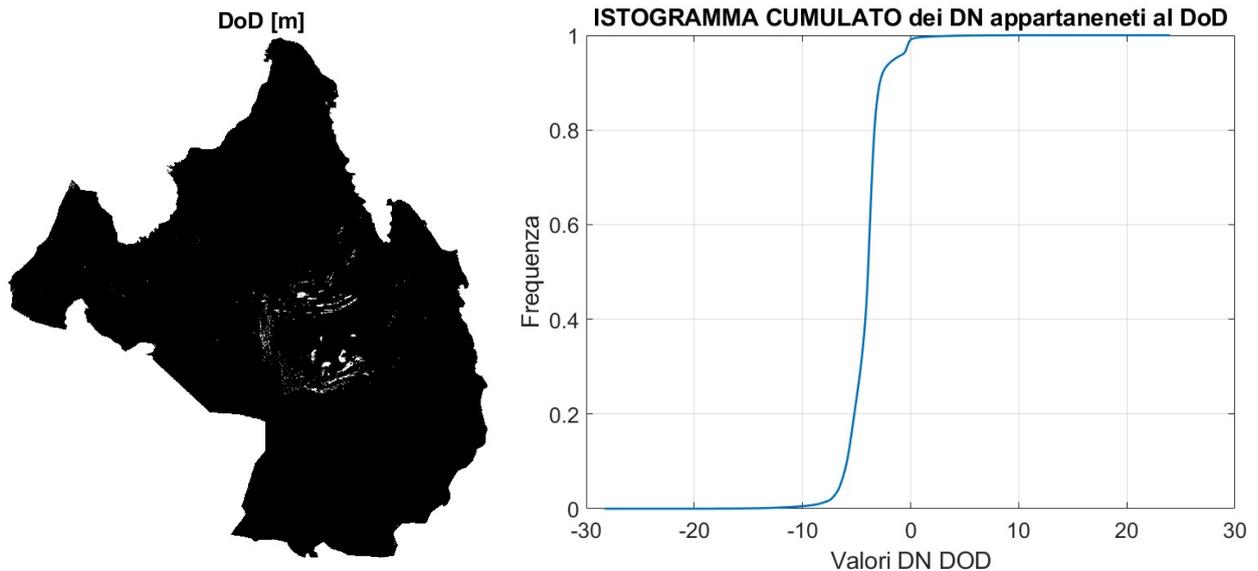


Figura 119: DoD e Curva di frequenza empirica senza l'imposizione di soglie

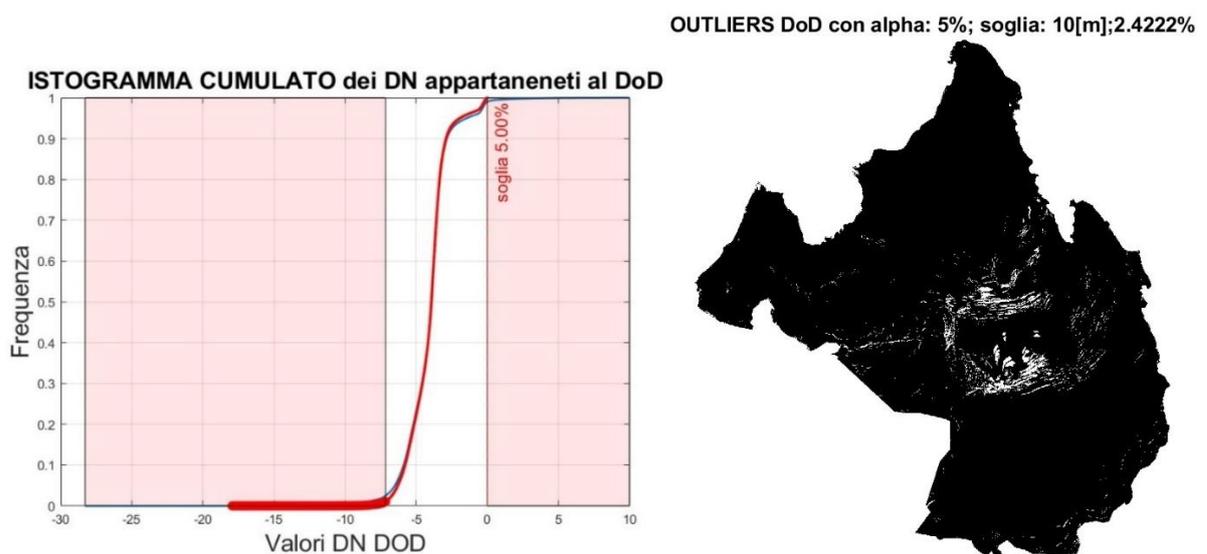


Figura 120: Curva di frequenza empirica delle variazioni di quota (DN DoD) con l'applicazione delle soglie e inclusione dei dati del fronte (cerchi rossi); In bianco su sfondo nero i pixel del DoD esclusi con l'imposizione delle soglie

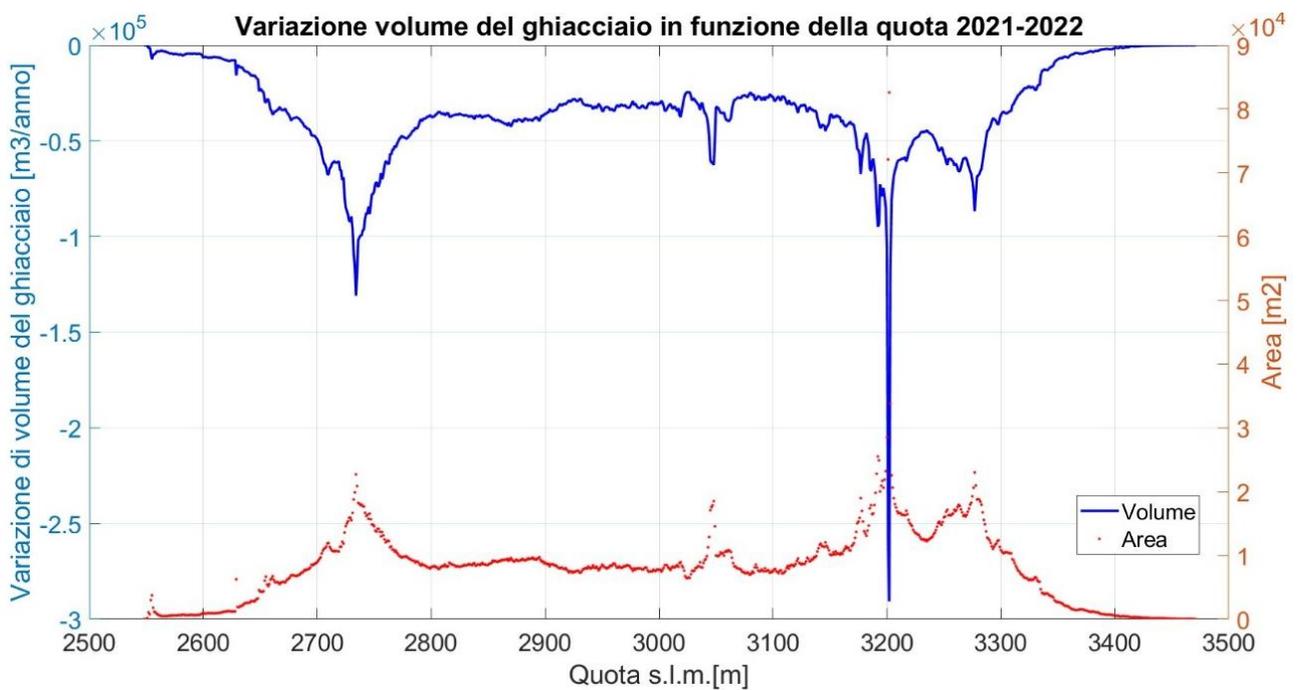
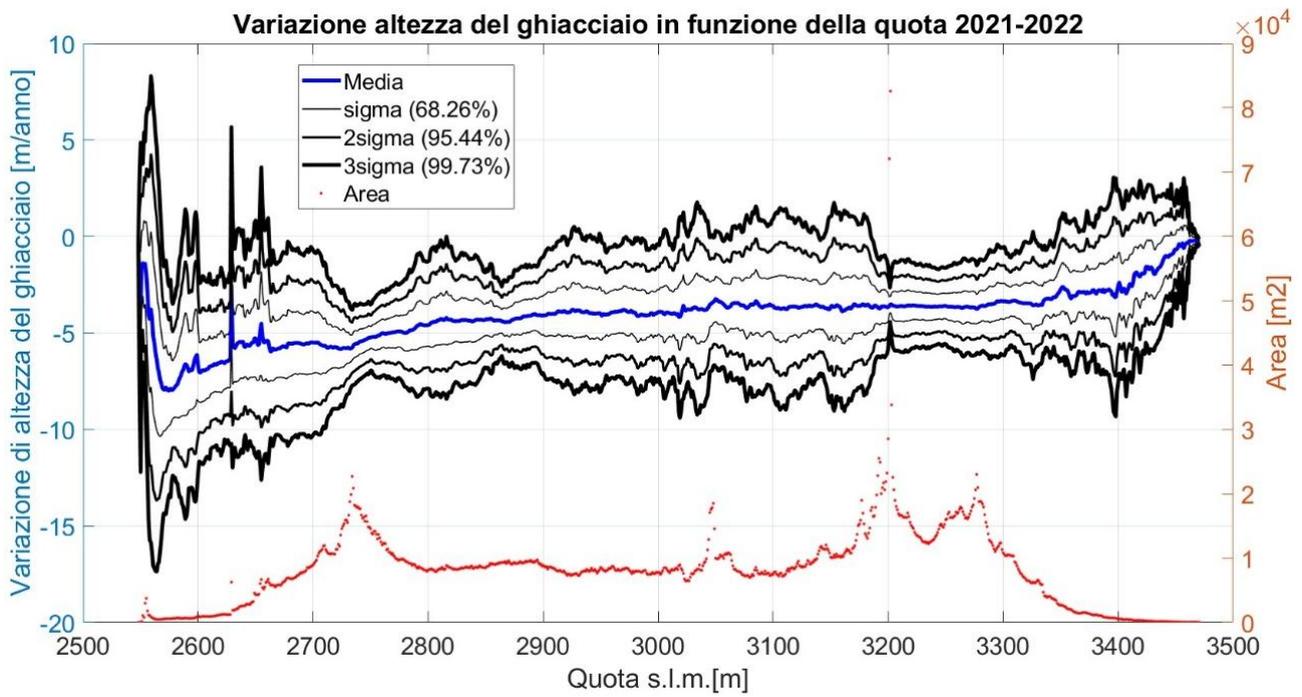


Figura 121: In blu media e deviazione standard della variazione di altezza e volume dei pixels rappresentati la stessa quota. In rosso l'area del ghiacciaio al variare della quota

2022 2023

- Soglia 10 [m]; alpha 5%; Soglie definite dal livello di significatività alpha 1.8127 -4.1697
Intervallo di valori compresi i dati sul fronte non soggetti a soglia -12.0095 1.8127
- Mediana -0.5271 [m] Media -0.8887 [m] Sqm 1.6123 [m]
- Media senza code -0.949 [m] Sqm senza code 1.299 [m]
- Indice di Fisher, Skewnees -0.9248, Indice di Fisher Curtosi 0.6397
- Variazione di volume -6.9895e+06 [m³]

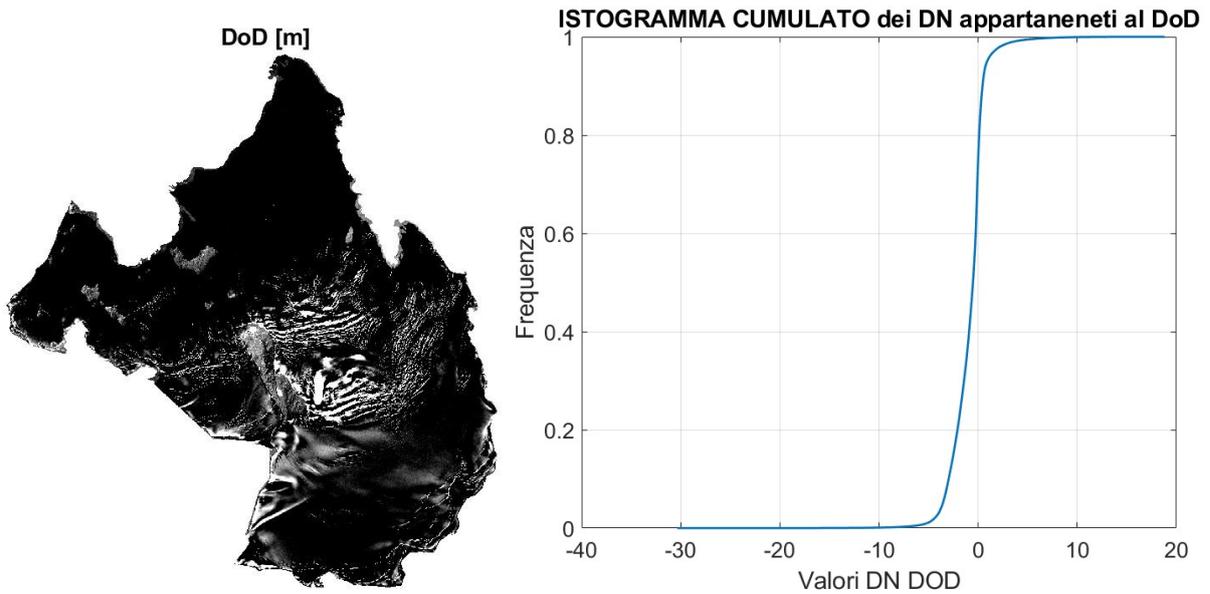


Figura 122: DoD e Curva di frequenza empirica senza l'imposizione di soglie

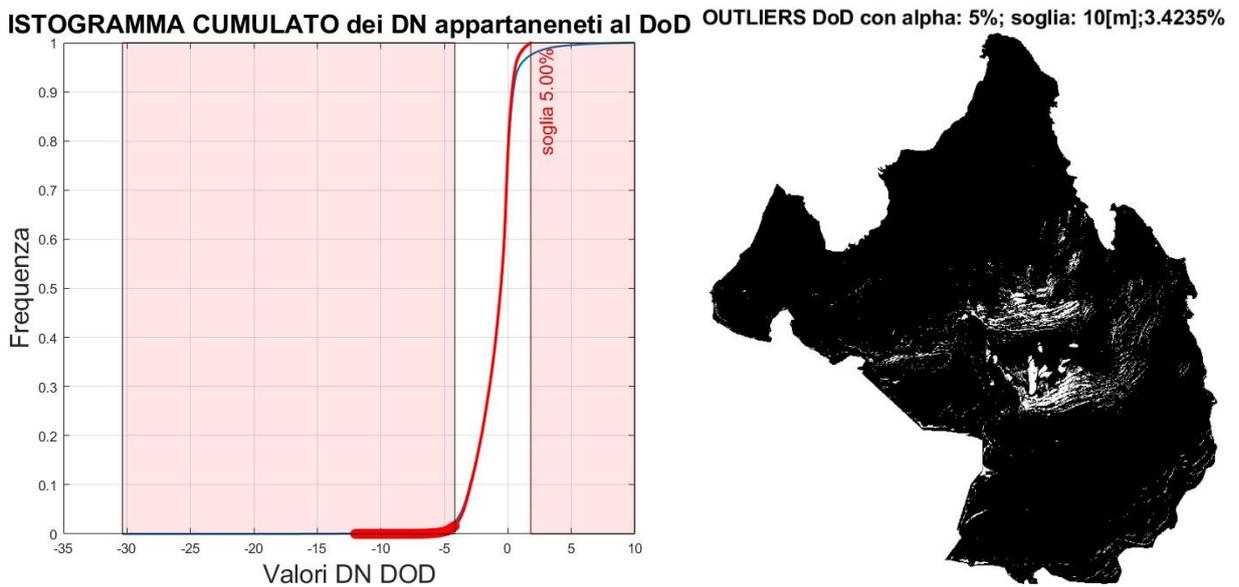


Figura 123: Curva di frequenza empirica delle variazioni di quota (DN DoD) con l'applicazione delle soglie e inclusione dei dati del fronte (cerchi rossi); In bianco su sfondo nero i pixel del DoD esclusi con l'imposizione delle soglie

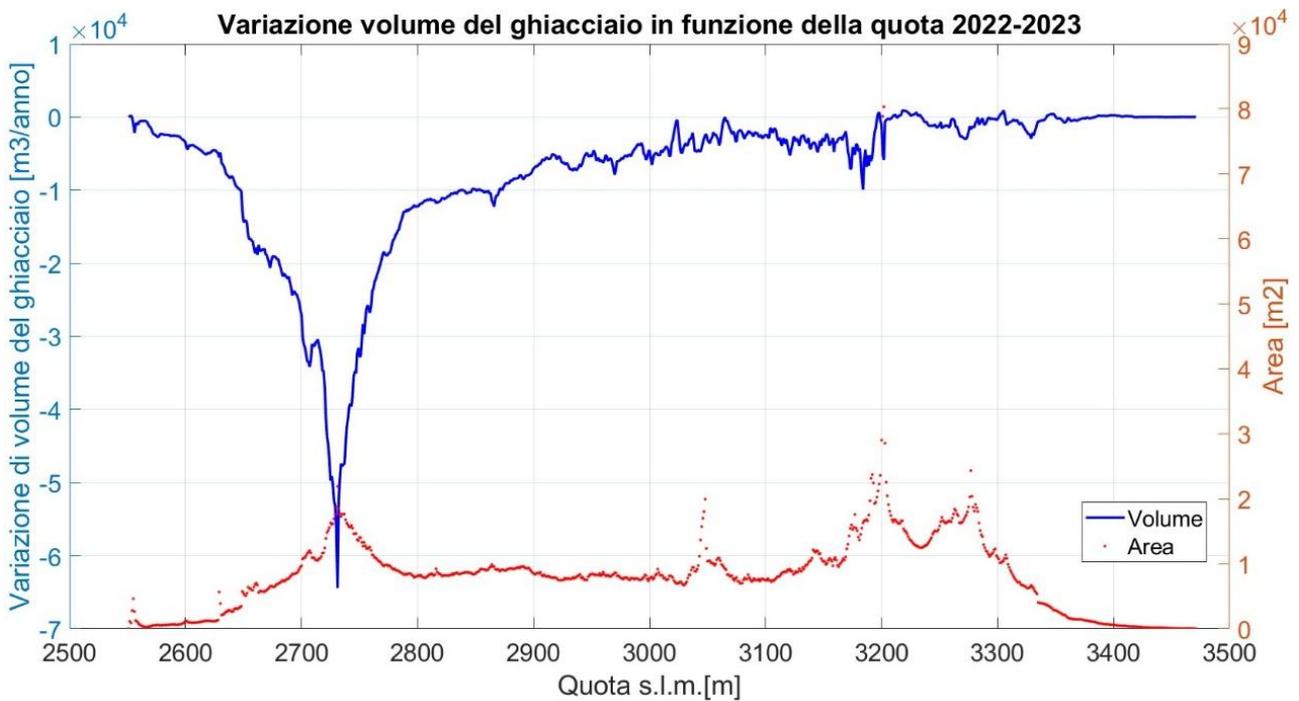
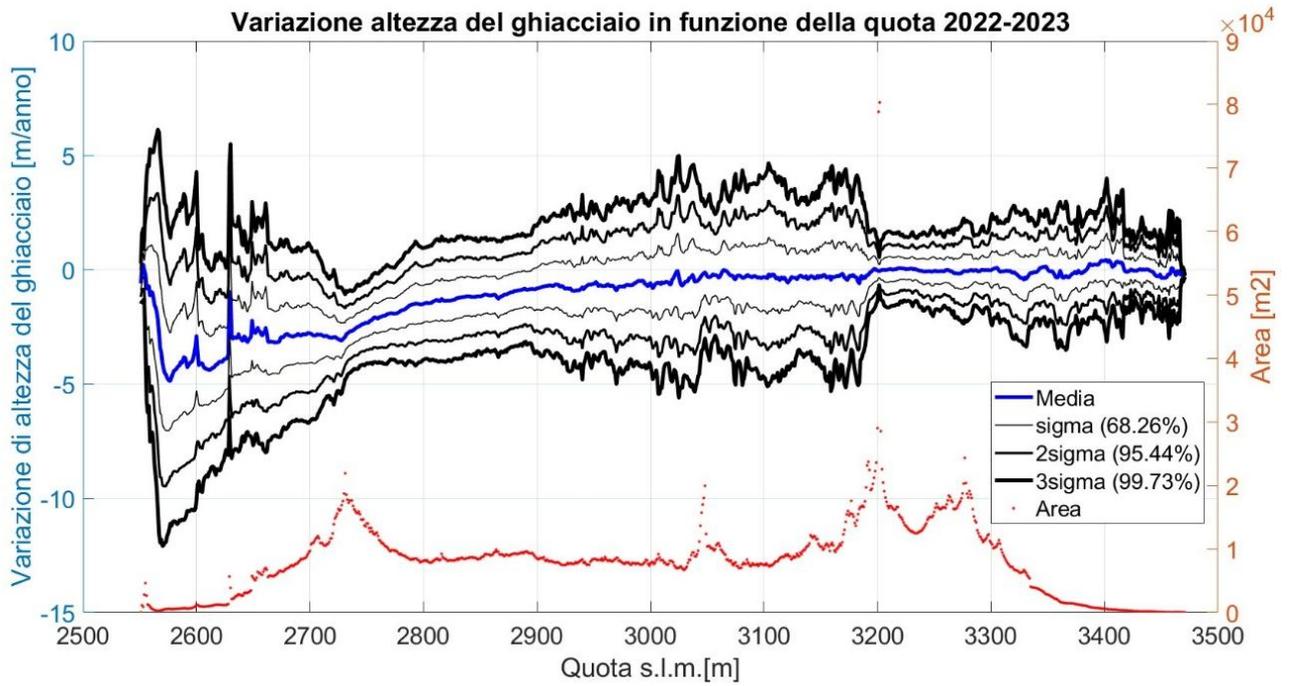


Figura 124: In blu media e deviazione standard della variazione di altezza e volume dei pixels rappresentati la stessa quota. In rosso l'area del ghiacciaio al variare della quota

2023 2024

- Soglia 10[m]; alpha 5 %; Soglie definite dal livello di significatività alpha 2.287/ -3.801 Intervallo di valori compresi i dati sul fronte non soggetti a soglia -10.3223/ 2.287
- Mediana -0.0288 [m] Media -0.3512 [m] Sqm 1.6861 [m]
- Media senza code -0.439 [m] Sqm senza code 1.508 [m]
- Indice di Fisher, Skewnees -0.781 Indice di Fisher, Curtosi -0.093
- Variazione di volume -3.2544 e+06 [m3]

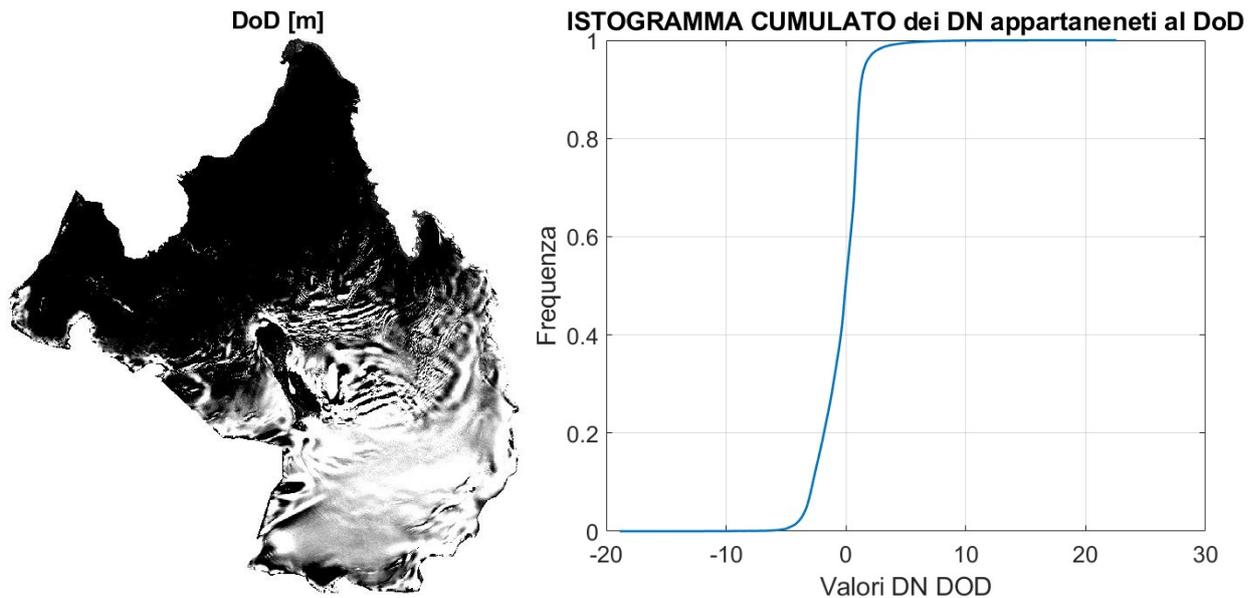


Figura 125: DoD e Curva di frequenza empirica senza l'imposizione di soglie

OUTLIERS DoD con alpha: 5%; soglia: 10[m];2.8234%

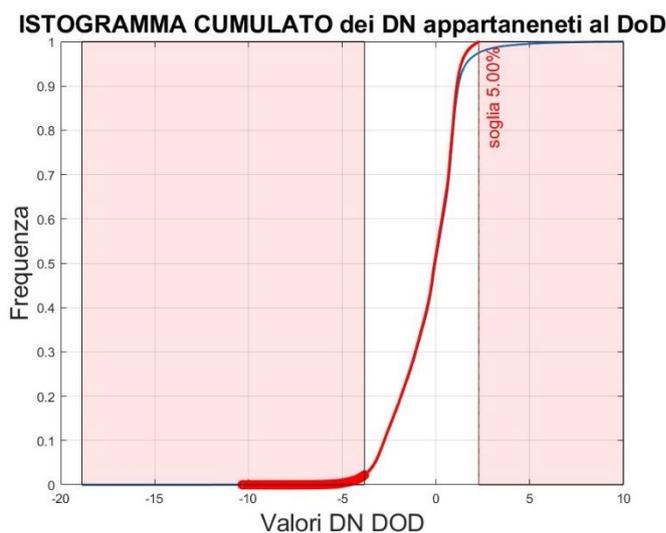


Figura 126: Curva di frequenza empirica delle variazioni di quota (DN DoD) con l'applicazione delle soglie e inclusione dei dati del fronte (cerchi rossi); In bianco su sfondo nero i pixel del DoD esclusi con l'imposizione delle soglie

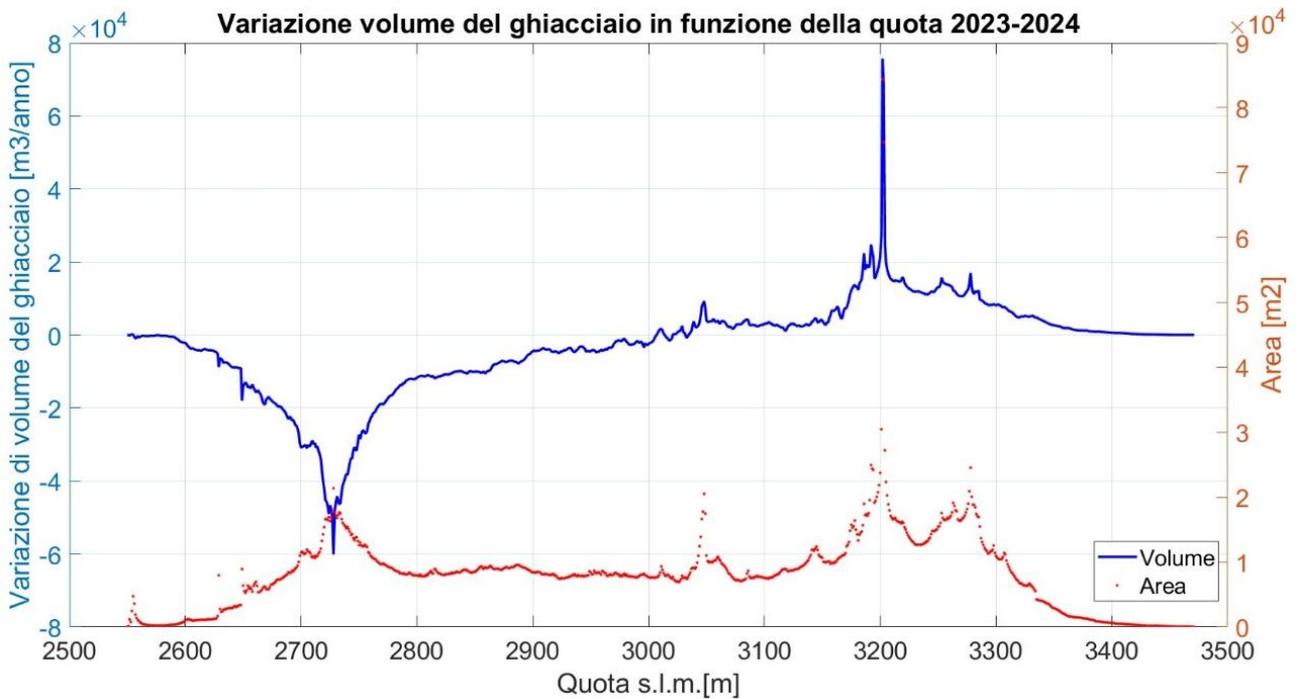
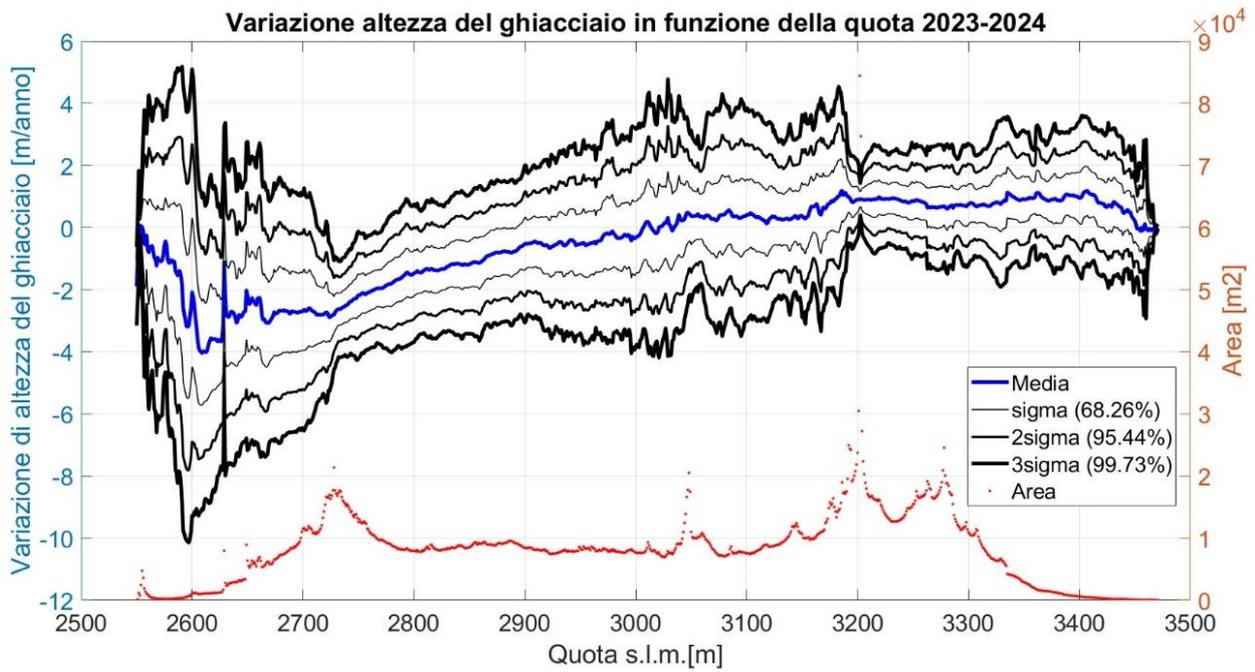


Figura 127: In blu media e deviazione standard della variazione di altezza e volume dei pixels rappresentati la stessa quota. In rosso l'area del ghiacciaio al variare della quota

5.5.3. Confronto dei risultati

Per svolgere il confronto quinquennale si sono raggruppati i risultati nella tabella 18 :

	2020-2021	2021-2022	2022-2023	2023-2024
Media Δh senza code [m]	-0.7472	-4.0974	-0.949	-0.439
Sqm senza code [m]	0.9691	1.308	1.299	1.508
Variazione di volume [m ³]	-5.50E+06	-3.05E+07	-6.99E+06	-3.25E+06
std Δh [m]	0.1137	0.0836	0.1552	0.1126
std volume	861015.3	633077.2	1175282	852685.3
std % sul volume	15.64771	2.0755268	16.81497	26.201

Tabella 18: Risultati dell'analisi statistica sulla variazione altimetrica e volumetrica del quinquennio

La deviazione standard volumetrica (std volume in tabella) è calcolata con il principio della propagazione della varianza per cui:

$$V = GSD^2 \cdot \Delta h \cdot \text{numero Pixels}$$

$$\sigma_{volume}^2 = (2GSD \cdot \Delta h \cdot \text{numero, Pixels})^2 \sigma_{GSD}^2 + (GSD^2 \cdot \text{numero Pixels})^2 \sigma_{\Delta h}^2$$

Posto $\sigma_{GSD} = 0$ data l'uguaglianza delle dimensioni dei pixels, risulta:

$$\sigma_{volume}^2 = (GSD^2 \cdot \text{numero, Pixels})^2 \sigma_{\Delta h}^2 ; \sigma_{volume} = GSD^2 \cdot \text{numero Pixels} \cdot \sigma_{\Delta h}$$

I dati di $\sigma_{\Delta h}^2$ sono stati calcolati nel capitolo precedente nell'analisi statistica dei DoD delle aree stabili, sono stati utilizzati i valori delle aree vicino ai GCPs. Il risultato denota che con la tecnica di rilievo fotogrammetrico e derivante calcolo dei volumi, il risultato può variare dal 16% al 30% del volume stimato.

È facile notare che l'annata peggiore è stata tra il settembre 2021 e 2022, con sia una media di variazione di quota che una variazione di volume molto maggiore in confronto alle altre annate. L'annata 2023 2024 risulta la migliore, dato il possibile accumulo visibile anche nell'analisi dei profili. Le annate 2020-2021 e 2022 2023 hanno un comportamento simile, anche se quest'ultima è caratterizzata da una varianza maggiore.

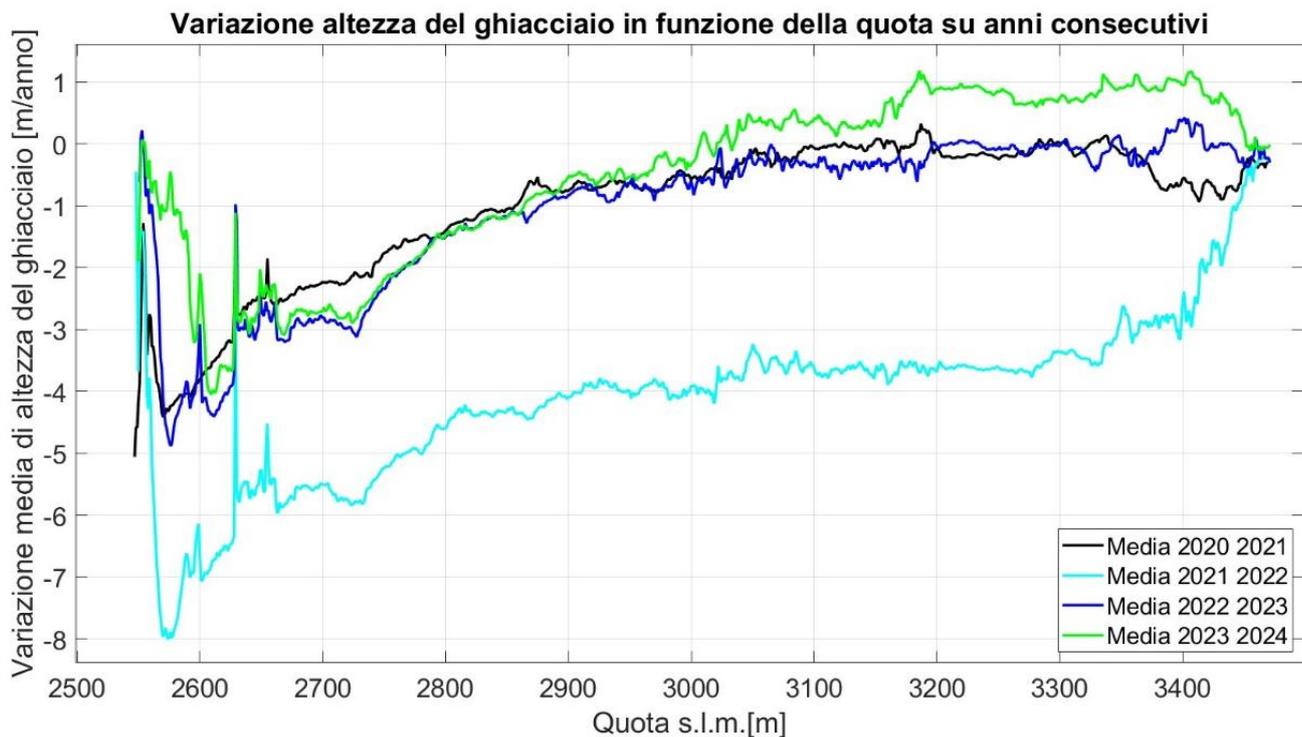


Figura 128: Confronto delle medie di variazione di altezza al variare della quota nel quinquennio 2020-2024

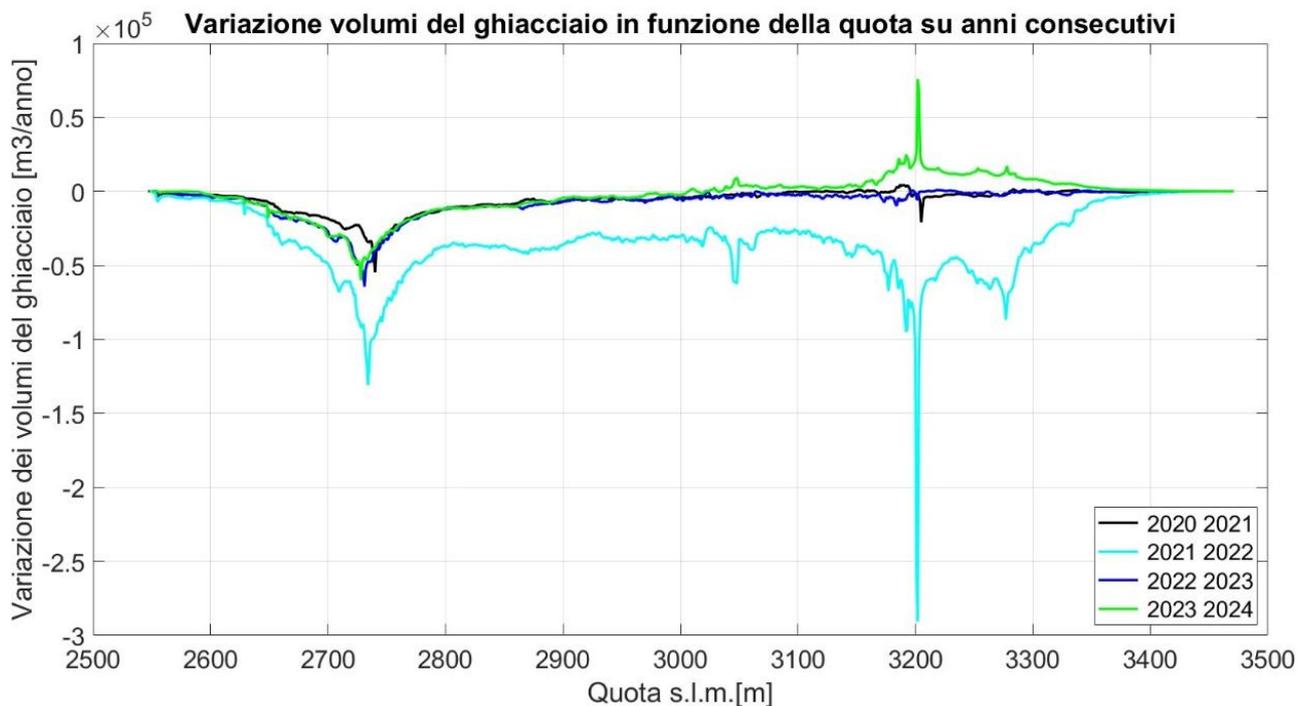


Figura 129: Confronto delle variazioni di altezza e volume al variare della quota nel quinquennio 2020-2024

Le stesse conclusioni precedentemente esposte sono confermate anche dal grafico delle medie delle variazioni altimetriche dei Pixel rappresentati la stessa quota (figura 128).

La linea azzurra 2021-2022 è sempre fortemente negativa a tutte le quote dimostrandosi l'annata peggiore. Non è presente un accumulo e i processi di fusione hanno colpito fortemente l'intera massa glaciale. Le linee nera 2020-2021 e verde 2022-2023 mostrano variazioni praticamente nulle nel bacino di accumulo (sopra i 2900m) e l'annata 2021 si dimostra meno negativa nel bacino di ablazione in confronto al 2023. La linea verde 2023-2024 è l'unica a mostrare un bilancio positivo sopra i 3000 m, ma è anche caratterizzata da un brusco abbassamento nel bacino di ablazione, associabile all'annata 2022-2023 e poco visibile nell'analisi globale dai volumi (tabella 18) che comprende anche l'accumulo in quota.

5.5.4. Script 4: Analisi statistica del DoD

Lo script per l'analisi statistica del DoD caratterizzante tutto il ghiacciaio e del media e deviazione dei DN al variare della quota è composto dalle seguenti sezioni:

- 1- Il programma necessita il caricamento dei DSMs, il GSD caratterizzante, l'imposizione di una soglia per l'eliminazione dei primi outliers, l'imposizione di un livello di significatività applicato al campione senza i valori superiori alla soglia e la quota di separazione tra il fronte e l'area dei crepacci.
- 2- Successivamente si svolge il calcolo del DoD e la formazione dei campioni statistici, tenendo conto delle soglie preimpostate. I campioni terranno conto sia dei valori di DoD che della quota a cui corrispondono nel DSM più recente.
- 3- Si procede con: l'analisi statistica dei valori di DoD, la generazione dei grafici delle funzioni di densità cumulata, il calcolo dei volumi associati ai valori di DoD usati nel calcolo statistico.
- 4- L'ultima sezione di calcolo va a formare i campioni per ogni quota del ghiacciaio, grazie alla memorizzazione iniziale dei valori di DoD associati ai valori del DSM più recente da cui sono stati calcolati. Per ogni quota, generato il campione, calcola media e deviazione standard.
- 5- Il programma si conclude con la generazione del grafico della media e deviazione standard al variare della quota e salvataggio delle variabili di cui è composto il grafico, necessarie per lo script 5.

5.5.5. Script 5: Plot dell'analisi del DoD nel quinquennio 2020-2024

Lo script 5 ha la funzione di generare un grafico per il confronto delle differenze in altezza al variare della quota. Le variabili rappresentate sono salvate dallo script 4 dopo che è stato applicato a tutti di DSMs del quinquennio.

5.6. Calcolo delle velocità di variazione areale (m²/anno) di tutta la superficie del ghiacciaio

5.6.1. Introduzione

Si è calcolata la velocità di arretramento areale (m²/anno) del ghiacciaio tra i diversi rilievi del quinquennio, tenendo conto in modo complessivo dei vari fenomeni di ablazione e accumulo nevoso che caratterizzano regioni diverse del Rutor. Si precisa che il dato analizzato deriva da un processo di tracciamento dei perimetri soggettivo, che se confrontato con dati elaborati da diversi operatori può variare anche per la precisione del tecnico che li ha disegnati. Non si è svolto un processo di classificazione dei pixel basato su algoritmi supervised o un-supervised.

5.6.2. Calcolo della variazione areale dai prodotti Digisky

Le aree, per i diversi anni, sono state tracciate con un processo foto-interpretativo delle ortofoto generate dai rilievi Digisky, di cui si denota un peggioramento nella qualità per l'anno 2024.

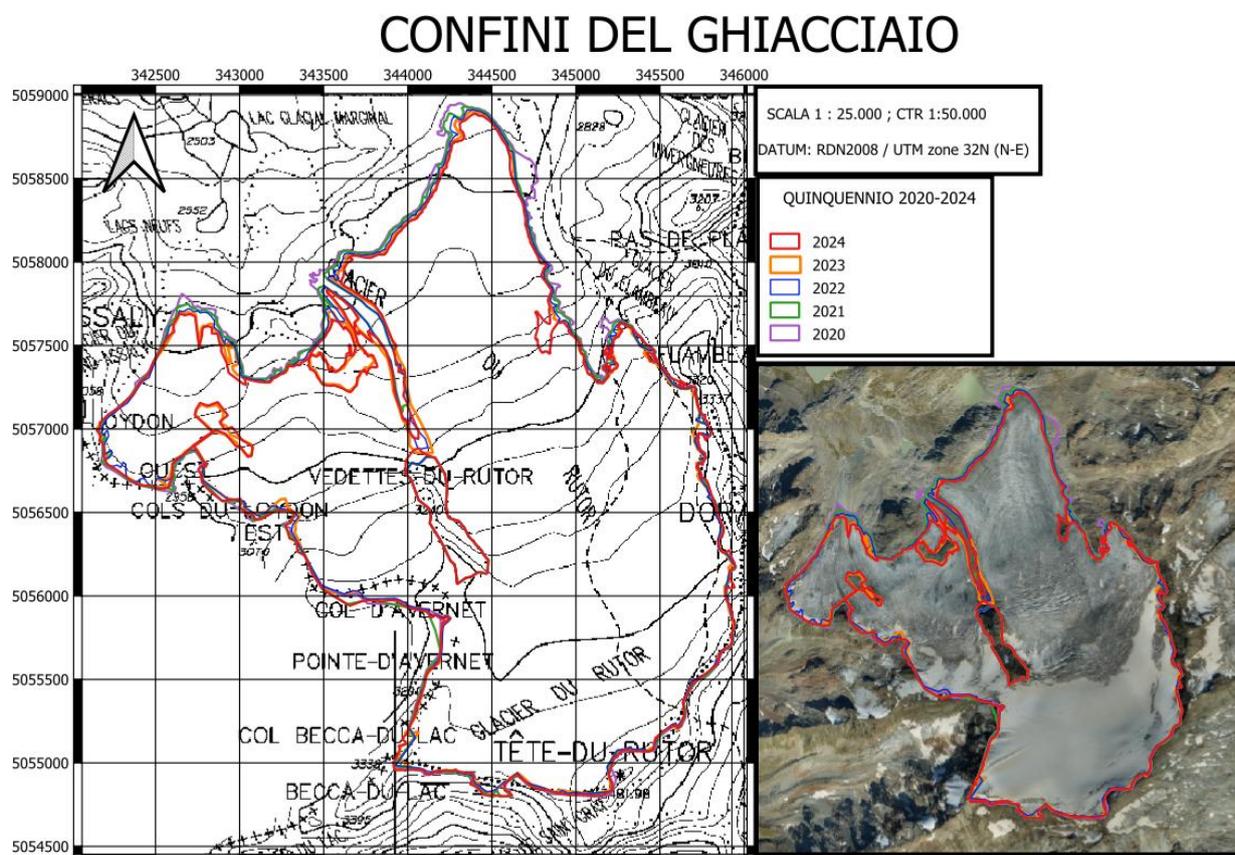


Figura 130: Tracciamento dei perimetri da prodotti fotogrammetrici Digisky

Rilievi	Area [m ²]	Diff annuale [m ²]	% Area tra rilievi	% Area cumulata
2020	7537688			
2021	7362642	-175046	-2.322	-2.322
2022	7170608	-192034	-2.608	-4.870
2023	6978438	-192170	-2.679	-7.420
2024	7031366	52928	0.758	-6.717

Tabella 19: Confronto tra prodotti fotogrammetrici Digisky

Dall'analisi dei risultati si può notare che dal 2020 al 2024 c'è stata una riduzione del 6.717% rispetto all'area de ghiacciaio nel 2020, con un ritiro di 0.526 Km². L'aumento di area del 2024 è visibile nella parte alta del ghiacciaio, sul perimetro del bacino di accumulo.

A differenza delle analisi precedenti, l'anno che risulta più incidente nel ritiro è 2022-2023 e non il 2021-2022. Questo è dovuto alla morfologia del bedrock sottostante, che in quella precisa annata si è fortemente scoperto nell'area vicino al lobo centrale del ghiacciaio, dividendolo in 2 parti. L'anno che risulta migliore è il 2023-2024 che pur soggetto ad un importante ritiro al fronte, nel complesso risulta di area maggiore rispetto all'anno precedente, probabilmente per precipitazioni solide antecedenti al rilievo, che hanno oltretutto coperto l'affioramento del bedrock precedentemente citato.

5.6.3. Calcolo del ritiro areale dal LIA al 2024

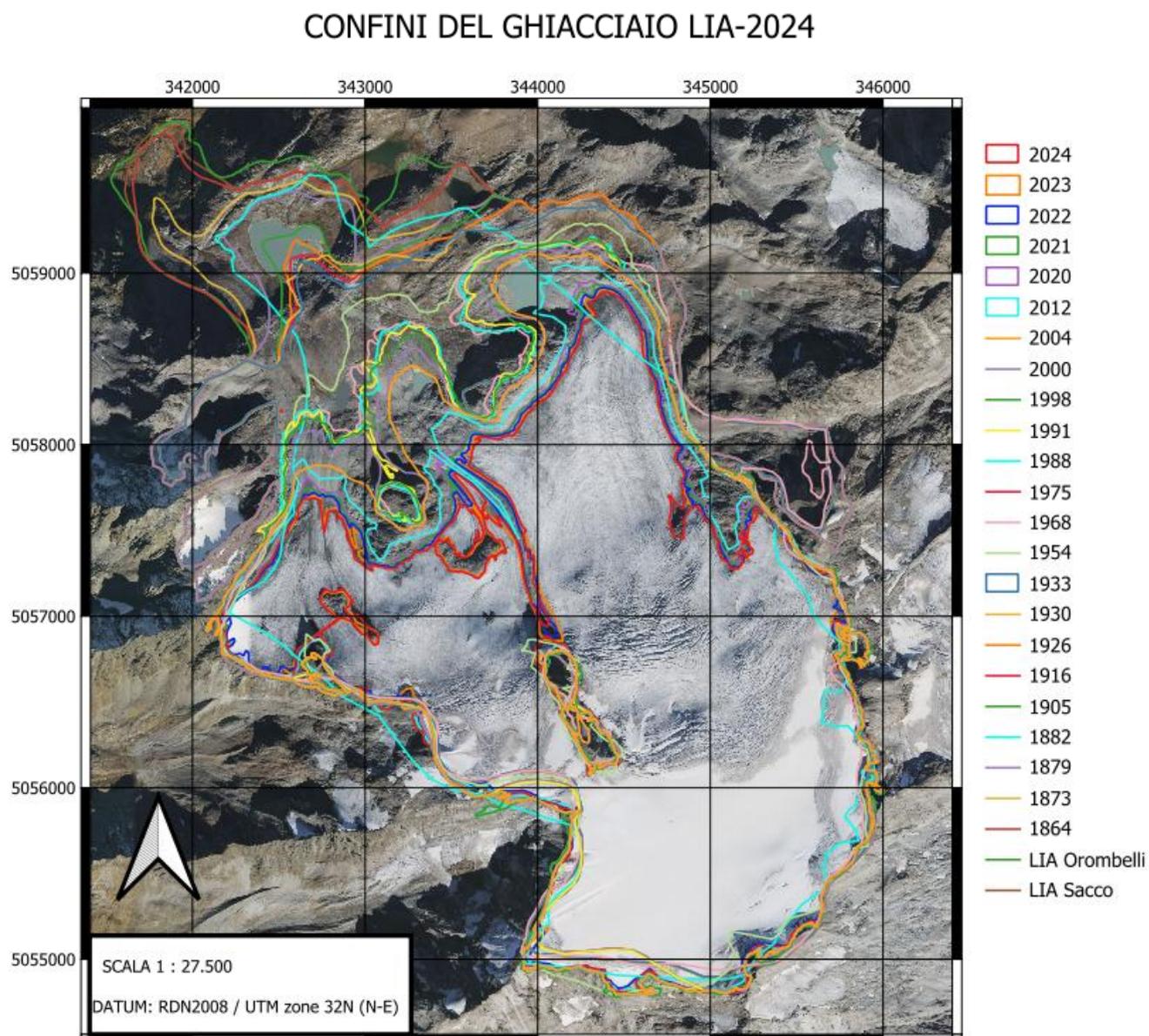


Figura 131: Tracciamento dei perimetri dal LIA al 2024.

Grazie alla collaborazione con il dott. Fabio Villa, glaciologo del Servizio Glaciologico Lombardo, è stato possibile confrontare i perimetri appena analizzati con i perimetri da lui tracciati nell'elaborazione della sua tesi di dottorato. Questo ha permesso di ingrandire l'analisi e sviluppare un confronto molto più approfondito e completo.

I **perimetri antecedenti al 2020** sono stati tracciati da diverse fonti cartografiche, ricostruzioni del fronte effettuate da diversi autori a partire dalla seconda metà del XIX secolo, ortofoto e rilievi sul campo: i perimetri del fronte del Ghiacciaio del Rutor relativi al 1864, 1873, 1879, 1905 e 1916 derivano da una ricostruzione del 1917 (Sacco, 1917) per un articolo pubblicato nel 1934 da Sacco

(Sacco, 1934). M. Bossolasco pubblicò una planimetria del fronte del 1926 (Bossolasco, 1928), mentre Peretti pubblicò una mappa del fronte del ghiacciaio del 1933 (Peretti, 1934); i perimetri del 1930 e del 1968 sono stati tracciati su cartografia IGM (tavole IGM: 28 III SO «La Salle» e 41 IV NO «Valgrisanche» alla scala 1:25.000) (Villa, 2007) ; i perimetri del 1975 e del 1991 sono stati tracciati sulla Cartografia Tecnica Regionale della Valle d'Aosta alla scala 1:10.000 (Villa, 2007); i perimetri del 1954 e del 1988 sono stati tracciati su ortofoto (Villa, 2007). Il fronte è stato rilevato in un rilievo topografico sul campo nel 1998 (Parigi, 1999); i perimetri più recenti del 2000 e del 2004 derivano rispettivamente da ortofoto e da rilievi GPS (Villa, 2007); il perimetro del 2012 è stato estratto dall'ortofoto disponibile sul geoportale della valle d'Aosta; i perimetri 2020,2021,2022,2023,2024 sono stati tracciati dalle ortofoto prodotte dai rilievi fotogrammetrici Digisky; l'estensione massima del ghiacciaio durante la Piccola Età Glaciale (intorno al 1820) è stata ricostruita durante un rilievo sul campo nell'estate 2004 (Orombelli, 2005).

La differenza tra aree (tabella 20) è calcolata sottraendo al dato LIA i rilievi successivi; la differenza annuale (tabella 20) è calcolata tra dati consecutivi e divisa per il numero di anni tra i due rilievi; la % di riduzione dell'area annuale (tabella 20) tiene conto del lasso di tempo interposto tra i rilievi rendendo i dati comparabili ed è calcolata tenendo conto come riferimento il rilievo più antico della coppia di dati consecutivi; la % di riduzione dell'area cumulata (tabella 20) è calcolata prendendo come riferimento il dato LIA. I calcoli sono stati svolti con l'utilizzo di Excel.

Rilievi	Area [m ²]	Diff [m ²]	Diff annuale [m ²]	% Variazione dell'area annuale	% Area cum.
LIA 1650	12471689				
1864	12251025	-220664	-1031.14	-0.0082	-1.769
1873	11813819	-657870	-48578.44	-0.3965	-5.274
1879	11542262	-929427	-45259.5	-0.3831	-7.452
1905	10757927	-1713762	-30166.73	-0.2613	-13.741
1916	10612557	-1859132	-13215.45	-0.1228	-14.906
1926	10645864	-1825825	3330.7	0.0313	-14.639
1930	10529835	-1941854	-29007.25	-0.2724	-15.570
1933	10471447	-2000242	-19462.66	-0.1848	-16.038
1954	9420253	-3051436	-50056.85	-0.4780	-24.466
1968	9207522	-3264167	-15195.07	-0.1613	-26.172
1975	9125099	-3346590	-11774.71	-0.1278	-26.833
1988	9202909	-3268780	5985.38	0.0655	-26.209
1991	9110951	-3360738	-30652.66	-0.3330	-26.946
1998	9076623	-3395066	-4904	-0.0538	-27.222
2000	8794609	-3677080	-141007	-1.5535	-29.483
2004	8569761	-3901928	-56212	-0.6391	-31.286
2012	7842186	-4629503	-90946.87	-1.0612	-37.120
2020	7537688	-4934001	-38062.25	-0.4853	-39.561
2021	7362642	-5109047	-175046	-2.3222	-40.965
2022	7170608	-5301081	-192034	-2.6082	-42.504
2023	6978438	-5493251	-192170	-2.6799	-44.045
2024	7031366	-5440323	52928	0.7584	-43.621

Tabella 20: Confronto tra rilievi dal LIA al 2024

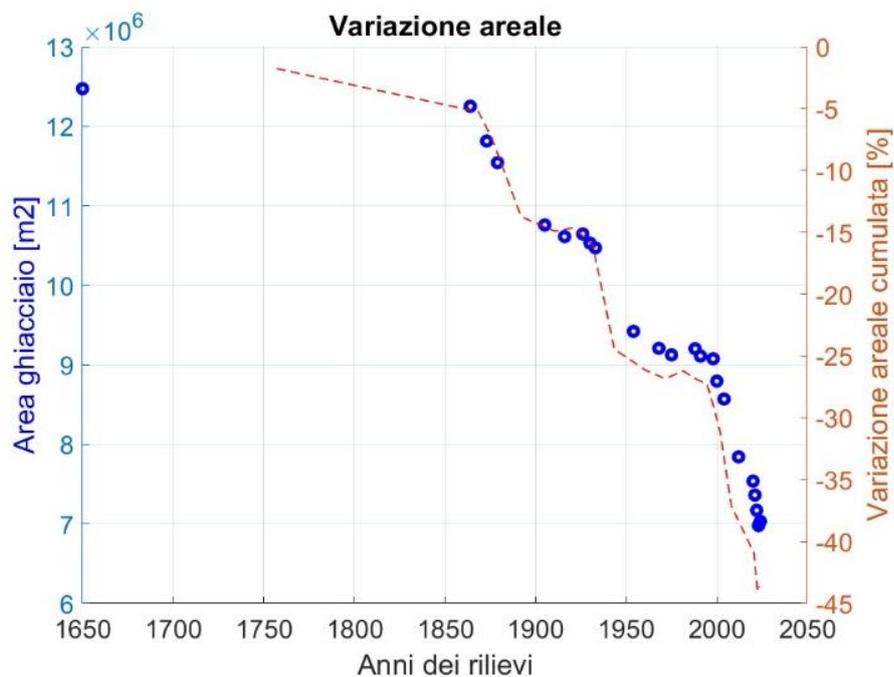


Figura 132: Rappresentazione grafica del confronto tra il LIA e il 2024, variazione areale cumulata in rosso, in blu l'area del ghiacciaio nei vari anni

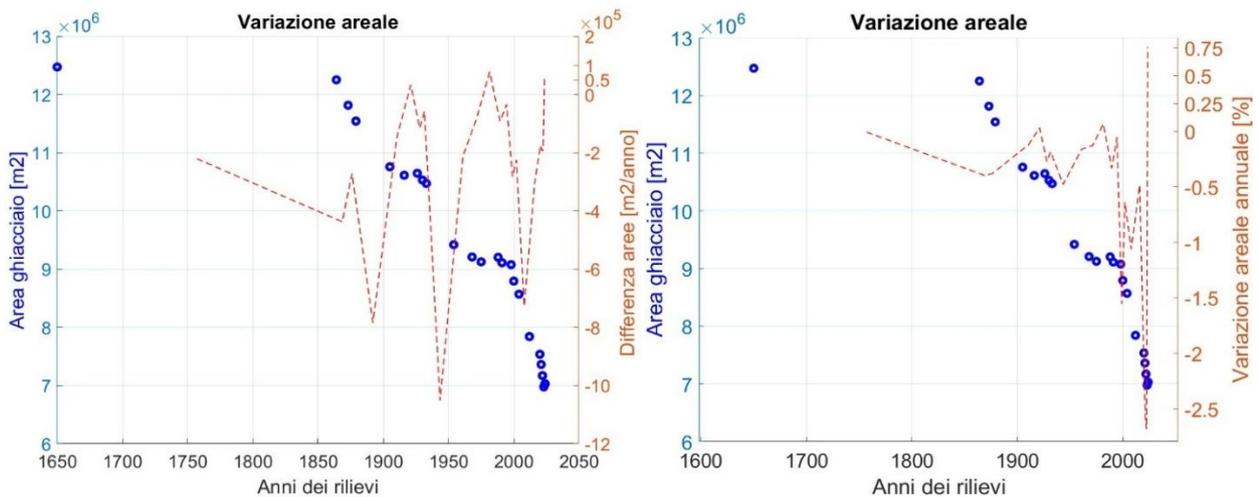


Figura 133: Rappresentazione grafica del confronto tra il LIA e il 2024, differenza annuale e variazione annuale % in rosso, in blu l'area del ghiacciaio nei vari anni

Il ghiacciaio del Rutor dal LIA (Piccola età glaciale) al 2024 ha subito una riduzione del 43.6% della sua area originale, corrispondente a 5.4 Km² (1343 campi da calcio) (figura 132). Gli intervalli temporali più significativi si sono verificati dal 1860 al 1900 e dal 1940 al 1950 (figura 133) con le differenze areali annuali maggiori e dal 2000 al 2024 è caratterizzato da una variazione areale annuale dal 1% al 2.5% (figura 133). Sono stati rilevati anche dei processi di incremento dell'area, ma data la poca rilevanza percentuale non si esclude che siano dovuti ai processi di rilievo e tracciamento dei confini. Inoltre dall'analisi dell'andamento globale della variazione areale annuale percentuale si assume che l'accumulo registrato nel 2024, il maggiore mai registrato, è da considerare con cautela come riferimento per quell'annata (figura 133).

5.7. Calcolo della velocità media di arretramento del fronte del ghiacciaio

5.7.1. Introduzione e metodologie di calcolo

I processi di ritiro e ablazione del ghiacciaio, come detto in precedenza, sono fortemente influenzati dal bedrock sottostante e dalle pendenze che lo caratterizzano, rendendo molto variabili i risultati in base all'area di studio.

Per il calcolo delle velocità si è deciso di seguire due approcci differenti: il primo con il tracciamento di profili lungo le direzioni di spostamento più rappresentative dei processi di ritiro, il secondo calcolando una distanza media di ritiro note l'area del bedrock affiorante dal processo ablativo e un lato significativo. Il primo metodo rispecchia gli spostamenti maggiori, che rappresentano un dato a cui l'occhio umano tende a dare più attenzione ma fortemente dipendente dalla direzione del profilo tracciato; il secondo metodo dà un risultato più rappresentativo dell'area completa, calcolando una media degli spostamenti indipendente alla direzione di misurazione.

Per il primo metodo si sono tracciati i profili considerando le due lingue e il lobo centrale del ghiacciaio, perché con comportamenti di ritiro differenti (fronte destro, fronte sinistro, lobo centrale), e si è fatta un'analisi più specifica per le lingue data la maggiore evidenza di ritiro del fronte. I risultati sono visibili nei grafici riassuntivi per il fronte destro, sinistro e completo di tutto il fronte. Per il secondo metodo, il dato è stato calcolato soltanto su tutto il fronte del ghiacciaio e non suddividendolo sui differenti comportamenti delle lingue.

Per il primo approccio sono stati presi in analisi i prodotti cartografici della serie storica 2020-2024 e si è aggiunto il dato 2008 scaricabile dal geoportale della regione Valle d'Aosta per un confronto. Non si è ampliato il calcolo a tutti i confini citati nel capitolo precedente, data la necessità di un DSM per il calcolo di ritiro reale lungo il piano campagna e non solo del dato planimetrico estraibile dalle ortofoto mediante tracciamento. Le distanze sono state calcolate applicando il teorema di pitagora tra i diversi punti di cui sono composti i profili, e l'inizio e fine dell'arretramento è stato selezionato mediante fotointerpretazione dei profili.

Il tracciamento dei profili segue i seguenti principi:

- 1) Si sono tracciati i profili affinché rappresentassero spostamenti significativi e di più interesse sui vari fronti del ghiacciaio
- 2) La direzione cardine dei profili è la direzione monte valle caratterizzante il versante

- 3) Con la possibilità di tracciare profili polyline, si è cercato di conservare la perpendicolarità tra i perimetri nei diversi anni

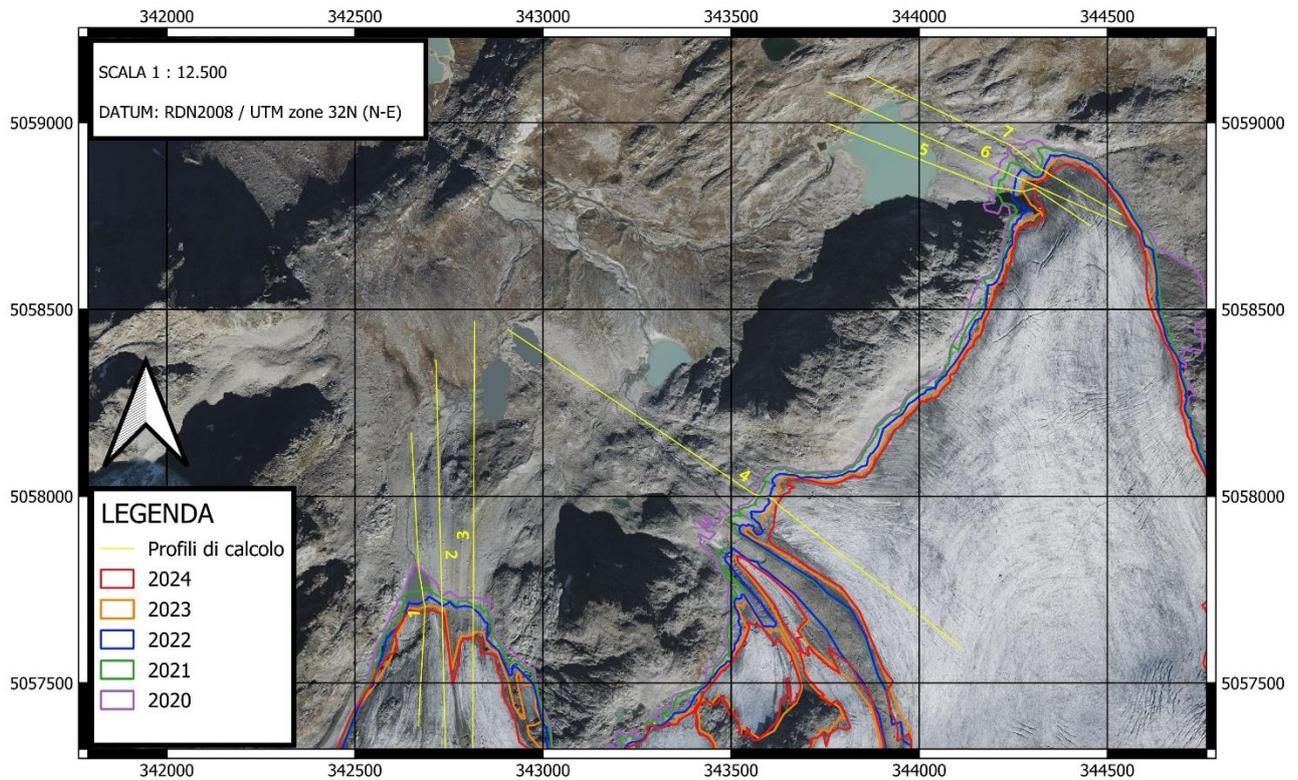


Figura 134: Profili per il calcolo della velocità di ritiro di tutto il fronte.

Nei grafici delle figure 136, 139 e 140 non è solo rappresentato il ritiro medio lungo i vari profili, ma mediante un approccio statistico anche la sua variabilità a σ , 2σ e 3σ . Nel caso in cui tale metodo restituisce la possibilità che si sia verificato un processo di ingrandimento dell'area del fronte, lo spostamento è posto uguale a 0 dato che dall'approccio foto-interpretativo è certo che non ci sia stato un aumento dell'area coperta dal ghiacciaio sulle lingue e sul lobo centrale.

5.7.2. Fronte sinistro / lingua occidentale

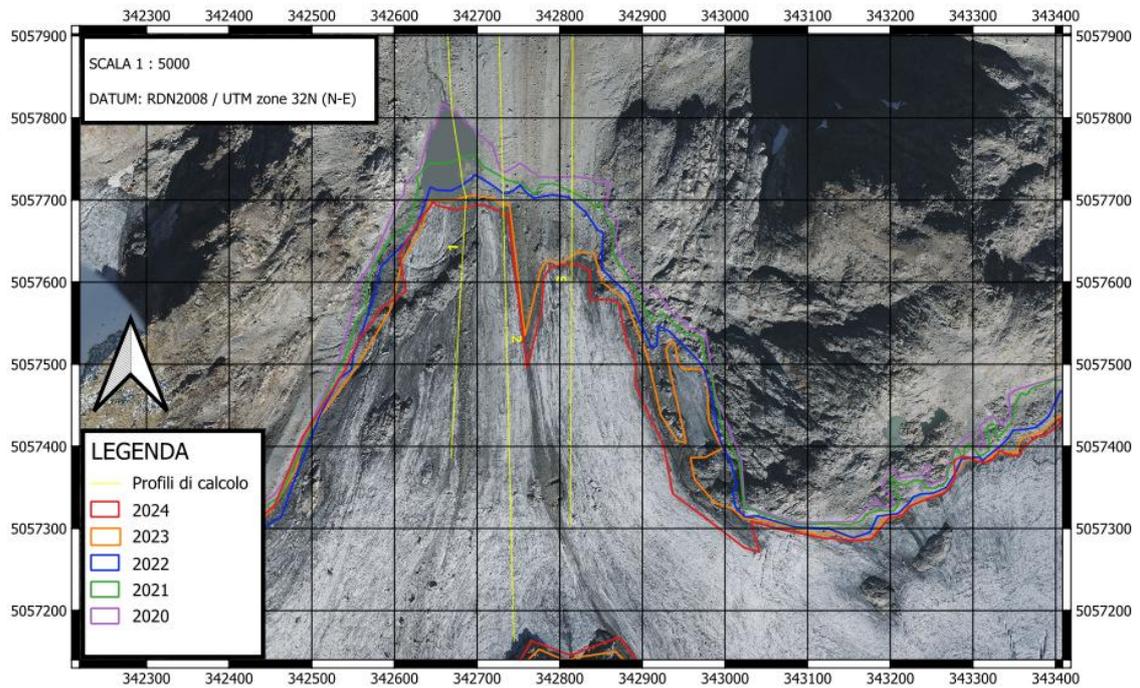
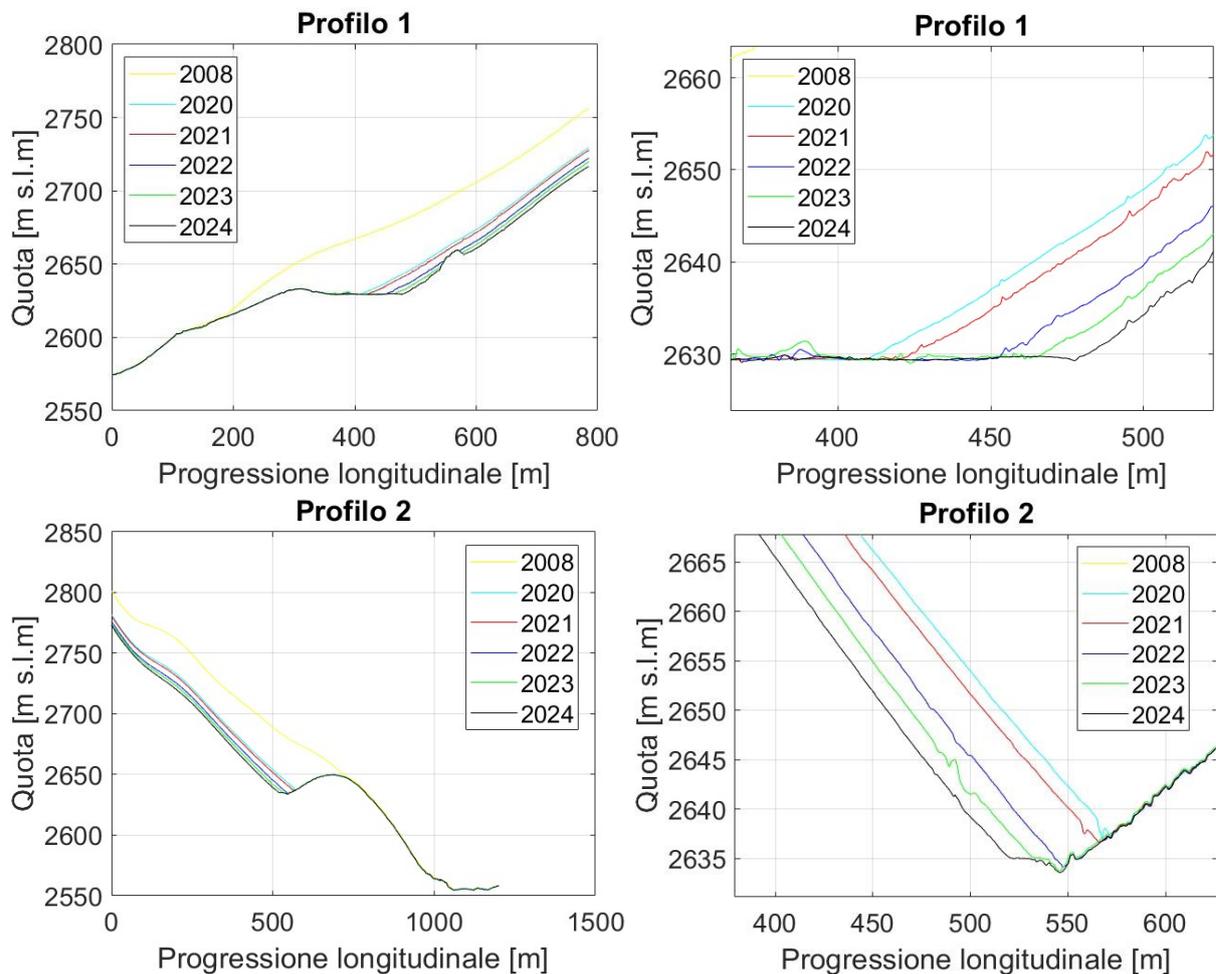


Figura 135: Profili per il calcolo della velocità di ritiro del fronte sinistro.



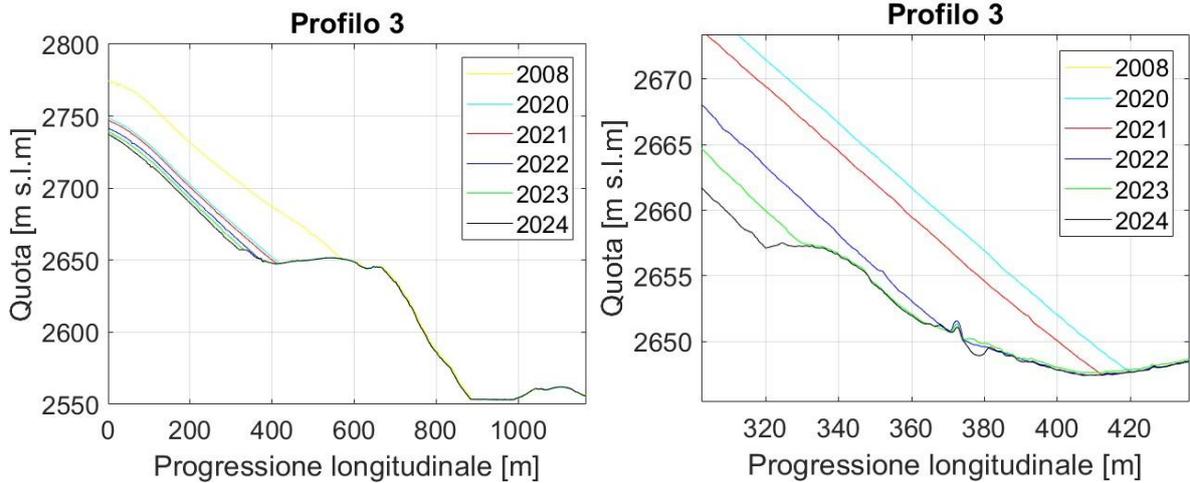


Figura 136: Profili lungo il fronte sinistro/occidentale

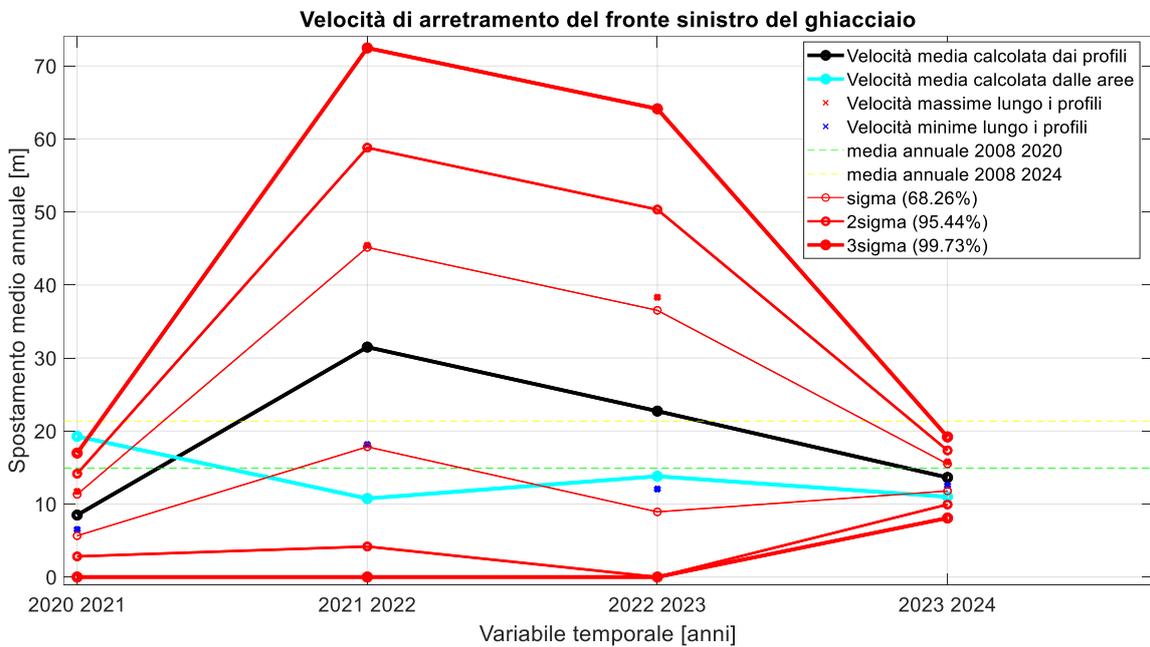


Figura 137: Risultati del calcolo di ritiro del fronte sinistro del ghiacciaio con entrambi i metodi.

L'annata 2021-2022 ha causato il ritiro maggiore del ghiacciaio raggiungendo i 45 m e una media di oltre 30m. Le annate 2020-2021 e 2023-2024 hanno un comportamento simile, con un ritiro che varia tra i 10 e 15m. Si nota una discrepanza tra i risultati del primo e secondo metodo per l'annata 2020-2021, dove il secondo approccio dà come risultato deformazioni di 20 m, più del doppio rispetto a quelle calcolate con il primo; e per l'annata 2021-2022 dove risultano delle deformazioni molto importanti nel primo metodo, nel secondo sono attenuate dal processo di calcolo e dalla copertura nevosa del bedrock affiorante sul perimetro del lobo centrale.

5.7.3. Fronte destro/ lingua orientale

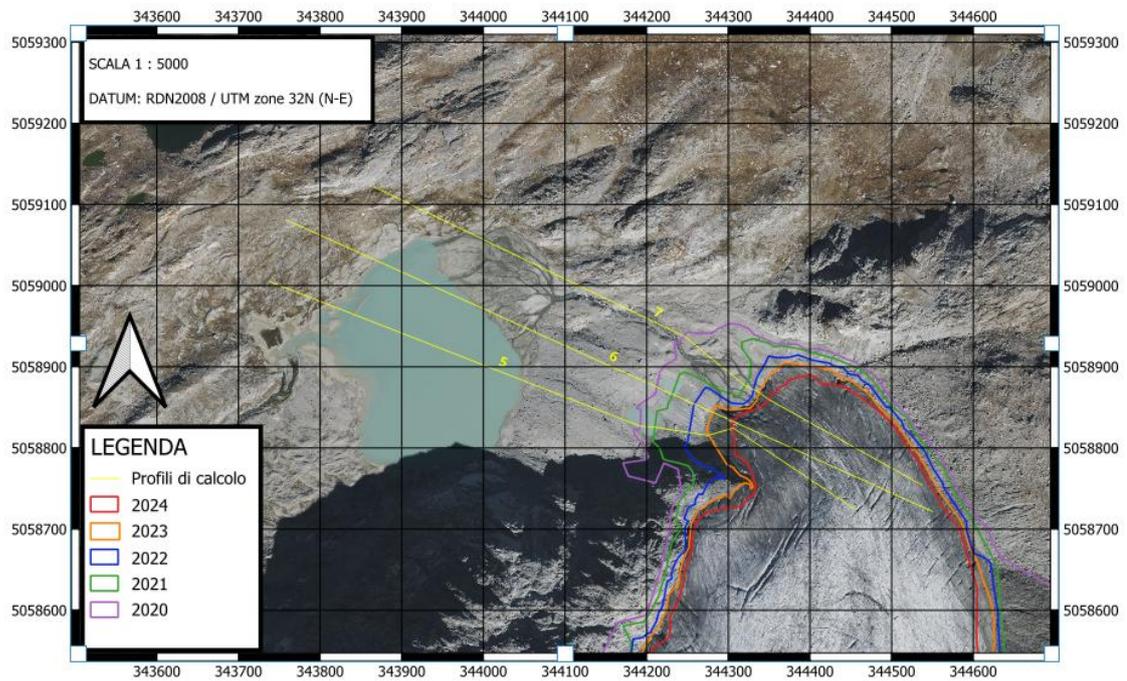
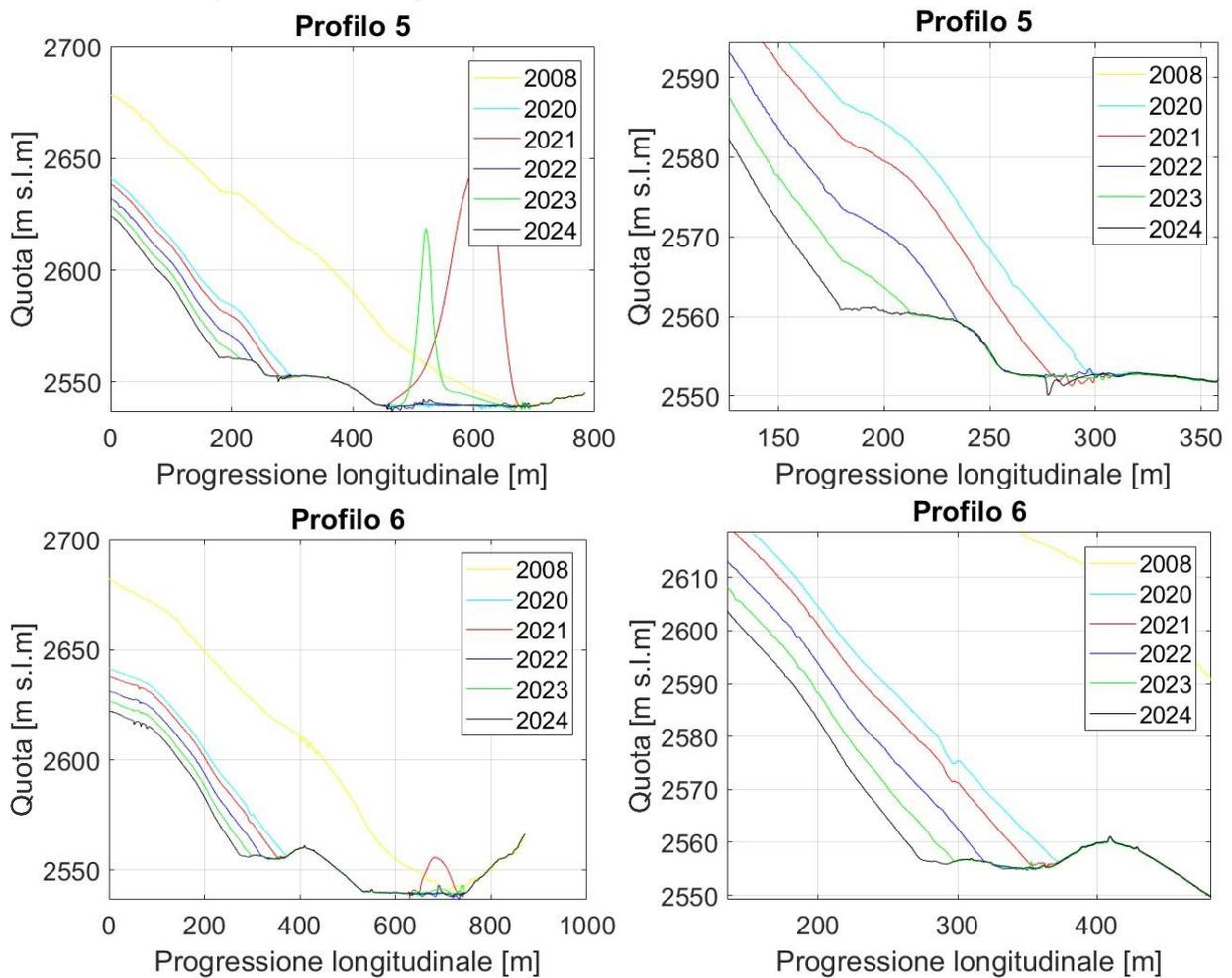


Figura 138: Profili per il calcolo della velocità di ritiro del fronte destro.



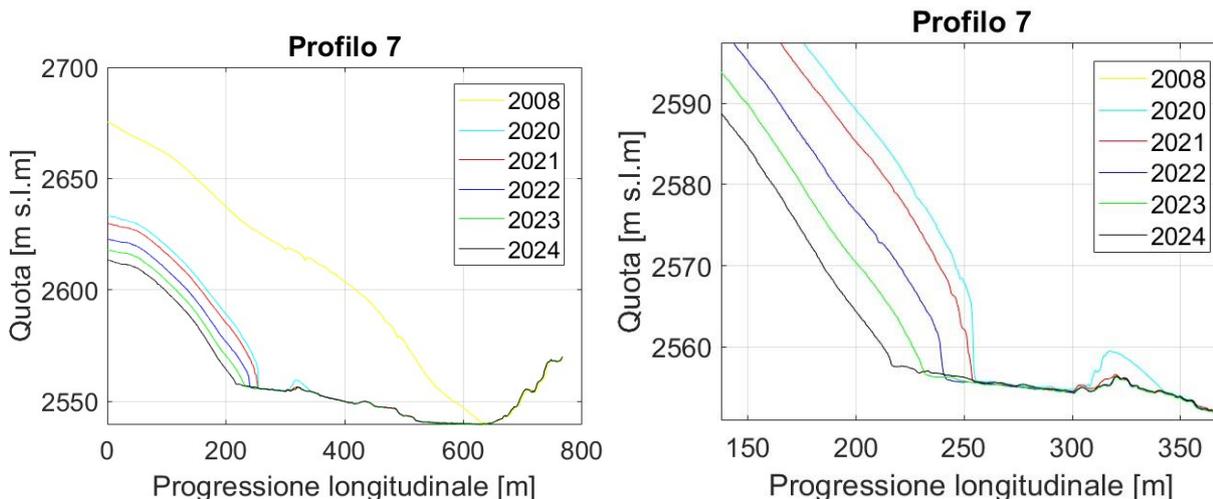


Figura 139: Profili lungo il fronte destro/orientale

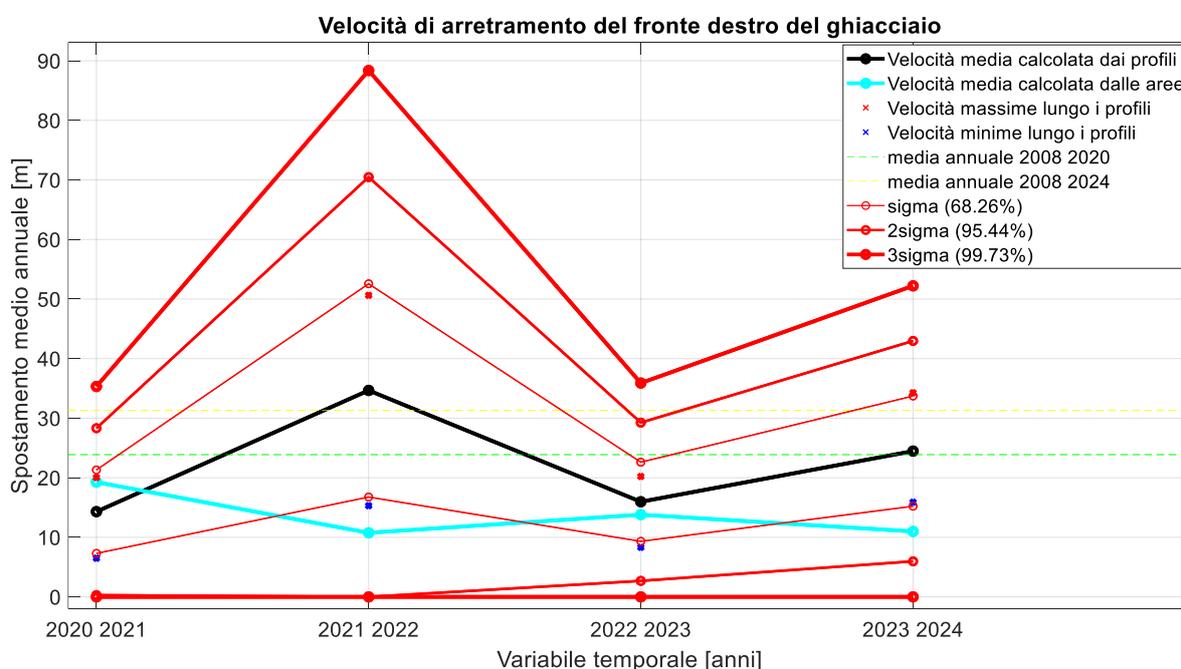


Figura 140: Risultati del calcolo di ritiro del fronte destro del ghiacciaio con entrambi i metodi.

L'annata 2021-2022 ha causato il ritiro maggiore del ghiacciaio raggiungendo i 50m e una media di 35 m. Le annate 2020-2021 e 2022-2023 hanno un comportamento simile, con un ritiro di circa 15m. L'annata 2023-24 denota un forte peggioramento passando da 13m a 25m rispetto al fronte sinistro. In ogni caso confrontando i due fronti è facile notare che il fronte destro è più soggetto ad ablazione in confronto al sinistro, tranne per l'annata 2022-2023. Si nota una discrepanza tra i risultati del primo e secondo metodo per l'annata 2020-2021, dove il secondo approccio dà come risultato deformazioni di 10m, quasi un quarto di quelle calcolate con il primo; Per l'annata 2021-2022 dove risultano delle deformazioni molto importanti nel primo metodo, nel secondo sono

attenuate dal processo di media e dalla copertura nevosa del bedrock affiorante sul perimetro del lobo centrale.

5.7.4. Fronte completo

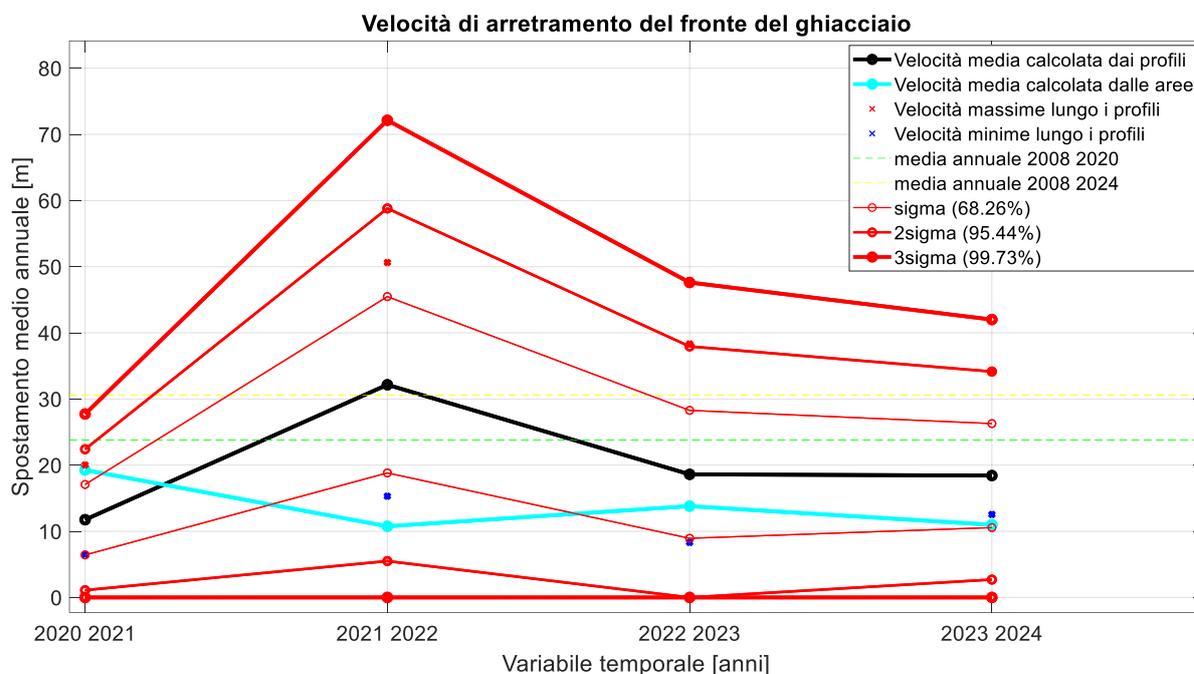


Figura 141: Risultati del calcolo di ritiro di tutto il fronte del ghiacciaio con entrambi i metodi.

I risultati dell'analisi del ritiro su tutto il fronte mostrano che l'annata 2021-2022 risulta essere la peggiore, come visto nei casi precedenti, con un ritiro medio di 30m, simile alla media annuale di ritiro calcolata nel lasso temporale 2008-2024 (linea gialla tratteggiata), che si rivela maggiore della media calcolata tra il 2008 e il 2020 (linea tratteggiata verde). Questo denota un incremento nel ritiro durante la serie storica (2020-2024) presa in analisi rispetto agli anni precedenti. L'andamento generale della media lungo la serie storica 2020-2024 (linea nera) è simile ai risultati citati nei paragrafi precedenti, come aspettatosi visto che nel caso del fronte generale è stato aggiunto solo un profilo lungo il lobo centrale. La media calcolata sulle annate 2022-2023 e 2023-2024 è molto simile, al contrario dei processi di accumulo che distinguono le annate. La velocità media calcolata con il secondo approccio denota un comportamento contrario, ma come nei casi precedenti è fortemente influenzata dal comportamento lungo le zone perimetrali delle lingue, in cui i processi di affioramento del bedrock sono influenzati dalla sua morfologia, acclività e copertura nevosa. Infatti i processi di precipitazione solida verificati nei periodi precedenti i rilievi,

impediscono un tracciamento preciso delle aree in cui è presente ghiaccio e non solo neve e bedrock.

Il codice di calcolo in linguaggio Matlab è disponibile nella sezione finale “Script” come Script 6

5.8. Tracciamento delle linee di equilibrio

5.8.1. Introduzione

La **linea di equilibrio (ELA)** è il luogo di punti che separa il bacino di accumulo e il bacino di ablazione del corpo glaciale e la sua quota e posizione rappresenta un parametro fondamentale per la comprensione dei processi di fusione che caratterizzano il ghiacciaio. Per il tracciamento delle linee di equilibrio si è utilizzato il tool implementato in QGIS per il calcolo delle isoipse, applicato alla differenza tra DSMs (DoD). Per cui la linea di equilibrio del ghiacciaio, cioè la linea in cui la variazione altimetrica tra i rilievi è pari a 0, corrisponderà con l'isoipsa pari a 0. Successivamente, per comprenderne l'andamento, si è visualizzato il profilo della linea di equilibrio al variare della quota e ne si è calcolata la quota media.

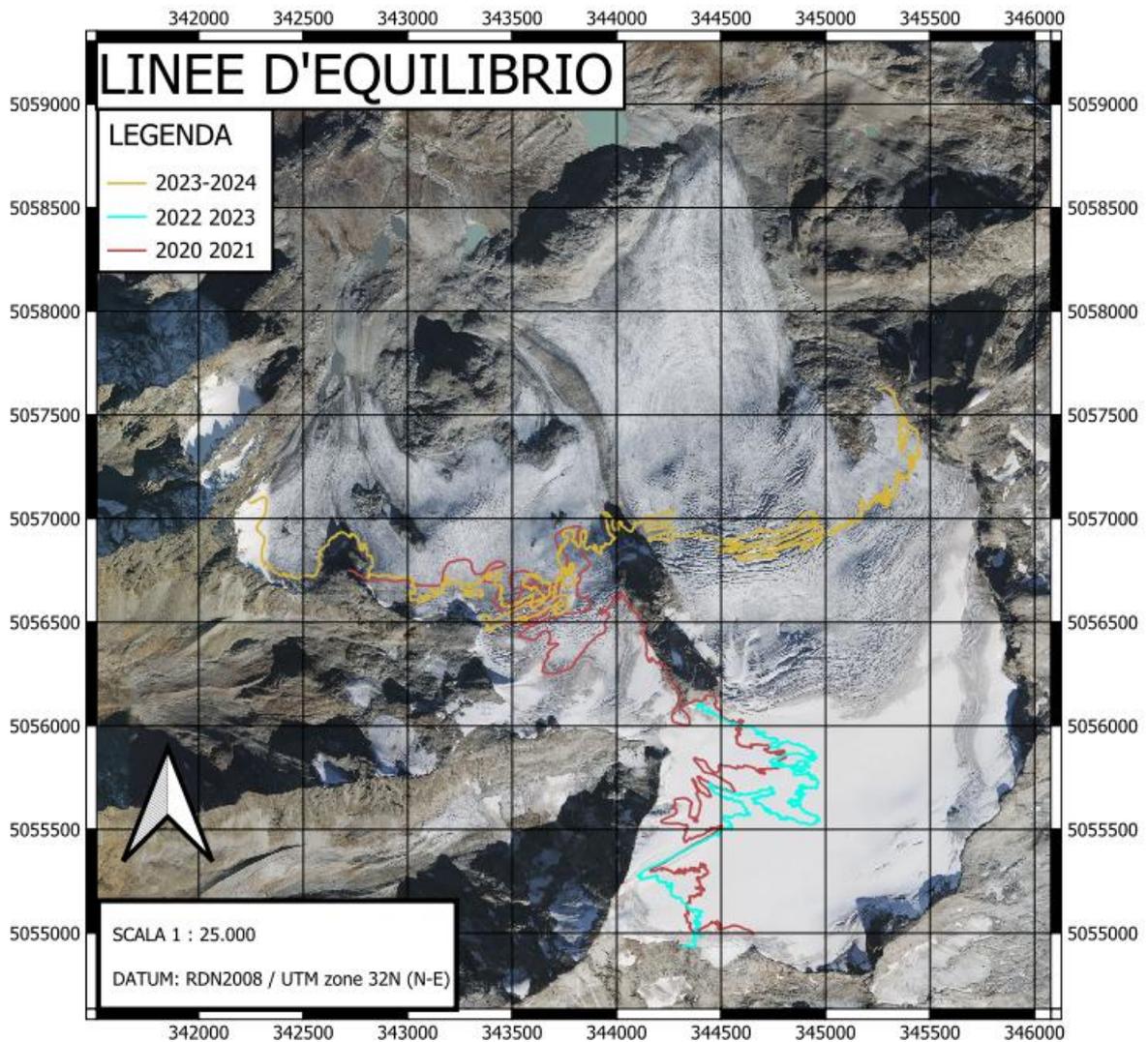


Figura 142: Linee di equilibrio 2020-2021, 2022-2023, 2023-2024.

Inizialmente, dalla prima visualizzazione dei risultati si è presupposta una dipendenza tra le linee di equilibrio calcolate da QGIS e la presenza dei crepacci, però, dopo il confronto con l'analisi delle variazioni altimetriche al variare della quota (figura 143), in cui, con l'utilizzo di Matlab si sono imposte soglie per attenuarne le influenze nel risultato, è evidente una forte similarità dei risultati.

I risultati ottenuti nel capitolo precedente 4.5 hanno rivelato come quote in cui la variazione media è pari a 0 (visibile nella figura 143 ed evidenziato dalle frecce verticali):

- 2020 - 2021 = 3120 m s.l.m.
- 2021 - 2022 = non rilevata
- 2022 - 2023 = 3215 m s.l.m.
- 2023 - 2024 = 3005 m s.l.m.

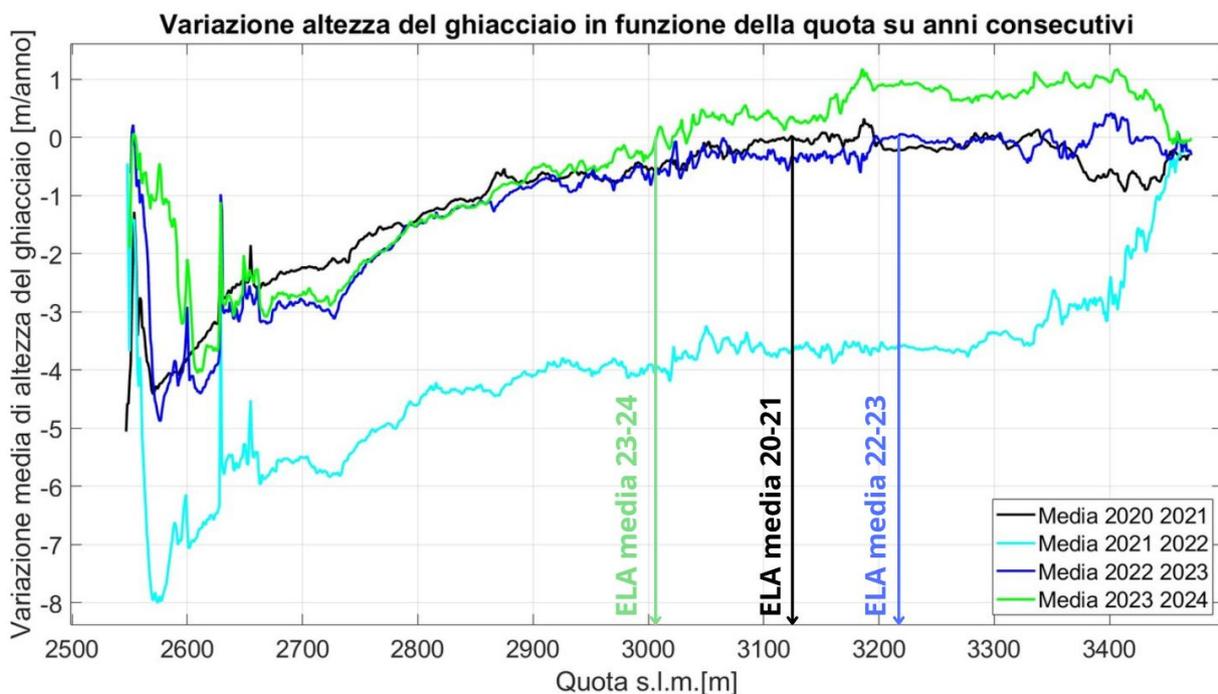


Figura 143: Media della quota dei pixel al variare della quota con estrazione delle quote di media pari a 0

5.8.2. Linea d'equilibrio 2020-2021

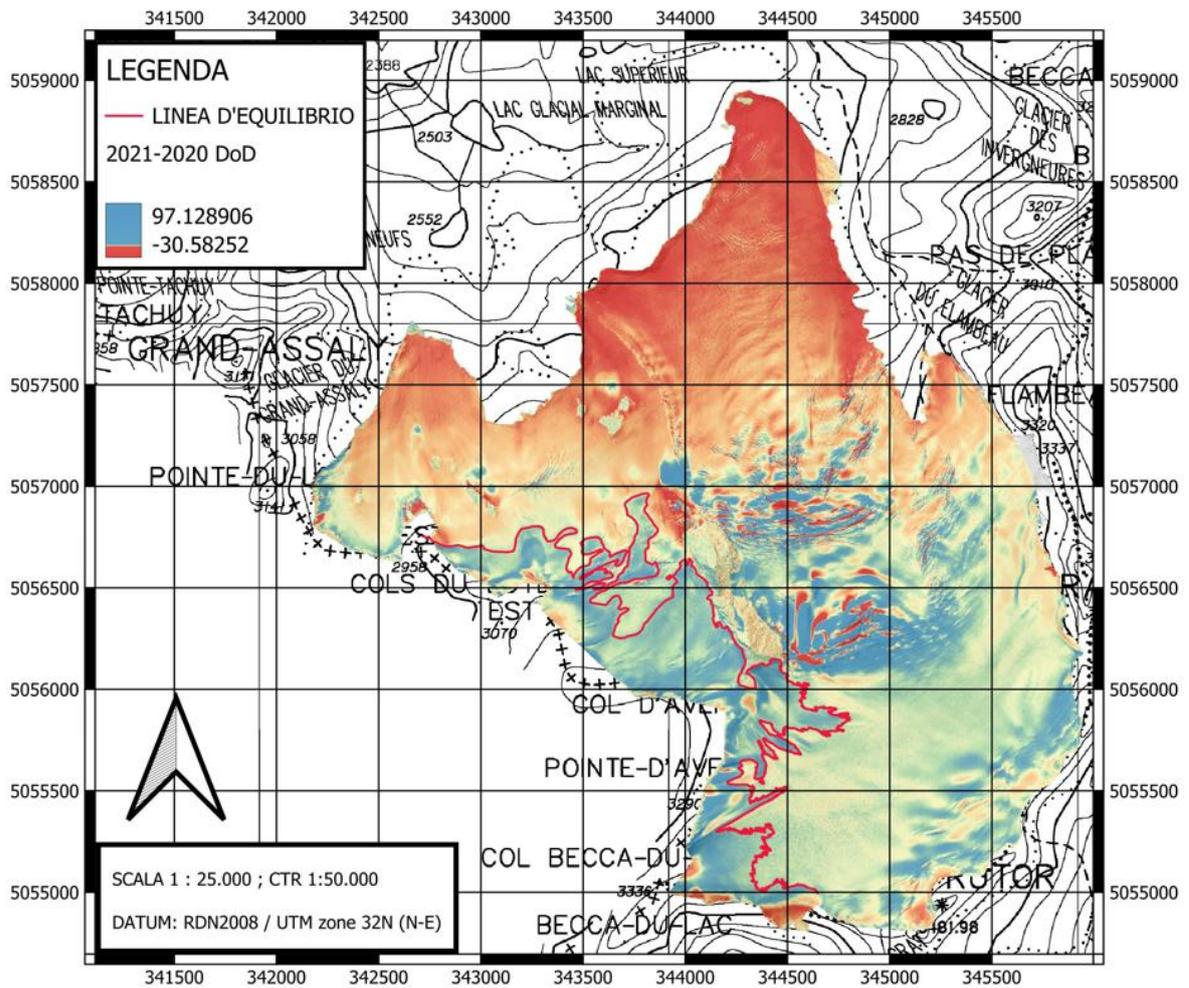


Figura 144: DoD 2020-2021 con la linea di equilibrio calcolata mediante Qgis



Figura 145: Profilo della linea d'equilibrio sul DSM più recente, tracciata con Qgis

Confrontati i risultati ottenuti dai due metodi si nota che, con l'utilizzo di QGIS, la media delle quote della linea di equilibrio risulta maggiore di 55m rispetto al calcolo della variazione media

delle altezze al variare della quota. Dalla figura 144 si può notare che l'accumulo è situato solo nell'area occidentale del ghiacciaio, probabilmente per processi di trasporto della neve dovuti al vento o per processi di deposizione di particelle solide nella parte orientale. La differenza di quota tra il valore massimo e quello minimo lungo il profilo della linea di equilibrio è di circa 400m (figura 145).

5.8.3. Linea d'equilibrio 2021-2022

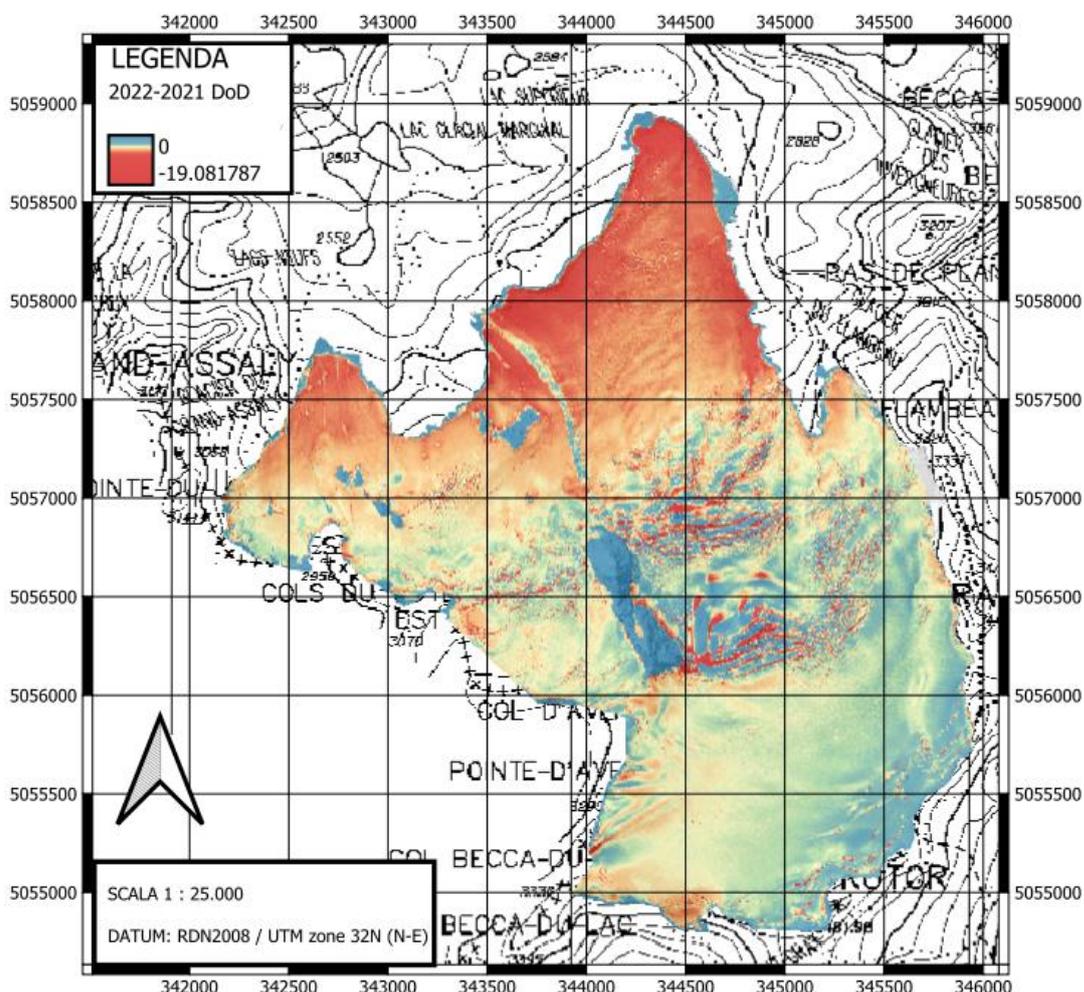


Figura 146:: DoD 2020-2021 con la linea di equilibrio calcolata mediante Qgis

L'annata 2021-2022, come visto nelle analisi precedenti, ha riportato processi di abbassamento e ritiro che hanno interessato fortemente tutta la superficie del ghiacciaio. Per cui procedendo con il tracciamento della linea di equilibrio, i risultati ottenuti sono perimetrali e coincidenti con le aree di bedrock stabili. Si può affermare che la linea di equilibrio 2021-2022 è più alta della quota massima del ghiacciaio stesso.

5.8.4. Linea d'equilibrio 2022-2023

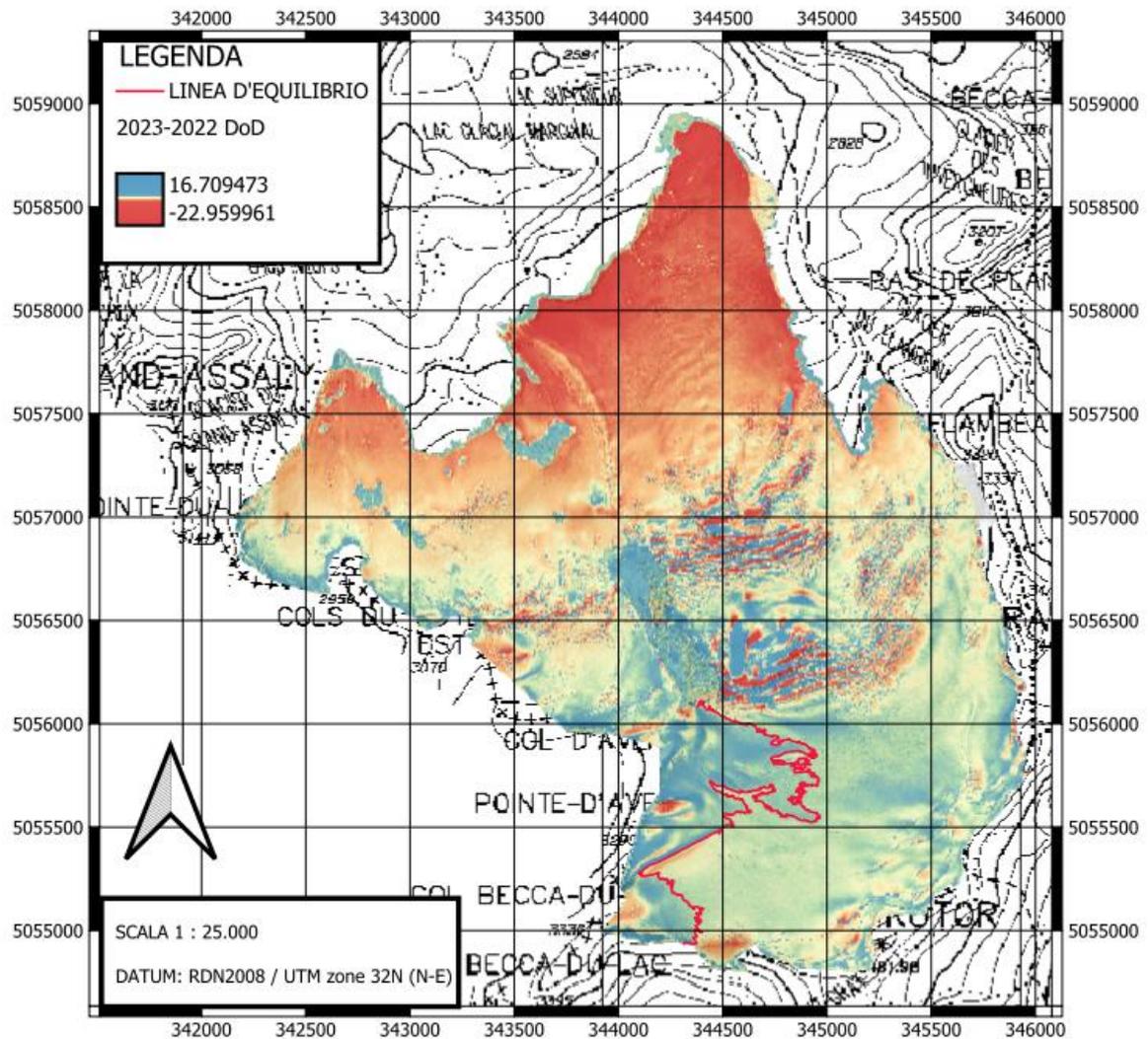


Figura 147: DoD 2022-2023 con la linea di equilibrio calcolata mediante Qgis

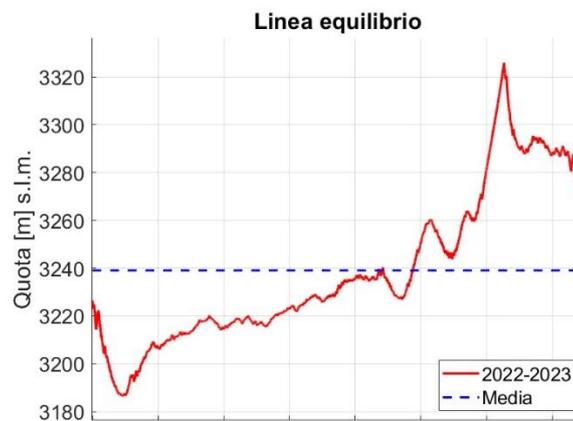


Figura 148: Profilo della linea d'equilibrio sul DSM più recente, tracciata con Qgis

Confrontati i risultati ottenuti dai due metodi si nota che, con l'utilizzo di Qgis, la media delle quote della linea di equilibrio risulta maggiore di 25m, e dalla figura 147 si può notare che l'aumento è situato solo nell'area del bacino di accumulo occidentale del ghiacciaio, probabilmente per processi di trasporto della neve dovuti al vento o per processi di deposizione di particelle solide nella parte orientale. La differenza di quota tra il valore massimo e quello minimo lungo il profilo è di circa 140m (figura 148).

5.8.5. Linea d'equilibrio 2023-2024

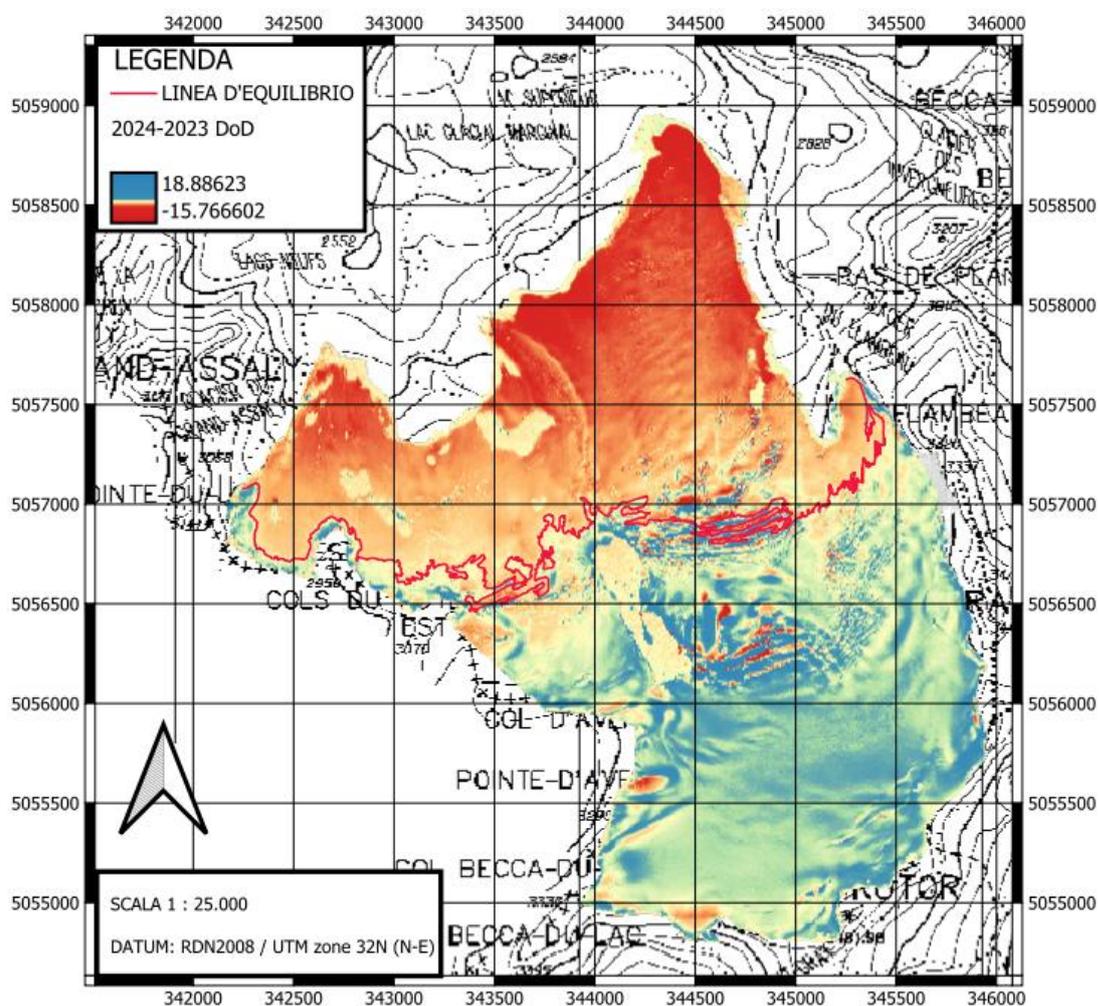


Figura 149: DoD 2023-2024 con la linea di equilibrio calcolata mediante Qgis



Figura 150: Profilo della linea d'equilibrio sul DSM più recente, tracciata con Qgis

L'annata 2023-2024 è la più importante per il processo di accumulo del ghiacciaio, come è visibile dai DoD e dall'altezza minore rispetto alle linee di equilibrio precedentemente calcolate, con una media di 3000m s.l.m.. Inoltre il risultato ottenuto da QGIS risulta minore di 5m rispetto a quello precedentemente calcolato, confermandone la valenza. La differenza di quota tra il valore massimo e minimo del profilo è di circa 275m (figura 150).

5.8.6. Analisi dei risultati

Dall'analisi dei risultati ottenuti si può notare come la ELA abbia subito un abbassamento altimetrico nell'annata 2023-2024 rispetto alle annate 2020-2021 e 2022-2023, dovuto all'importante processo di accumulo a cui è stato soggetto il ghiacciaio. L'abbassamento è di circa 200 m, come visibile nella figura 143, passando da 3100/3200 m s.l.m. ai 3000 m s.l.m.

5.9. Calcolo dell'altezza media della neve sul rilievo 2024

Con la finalità di comprendere meglio la precipitazione solida che caratterizza il DSM 2024, si è applicato un processo di analisi statistica sul DoD delle aree in cui fosse sicura la presenza di sola neve e non ghiaccio di accumulo. Le aree sono state selezionate sulle Vedette da un approccio foto-interpretativo delle ortofoto nelle due annate (figura 151). Questo permetterebbe di comprendere meglio la precipitazione solida sul ghiacciaio e quanto questa sia influente sul rilievo svolto nel 2024.

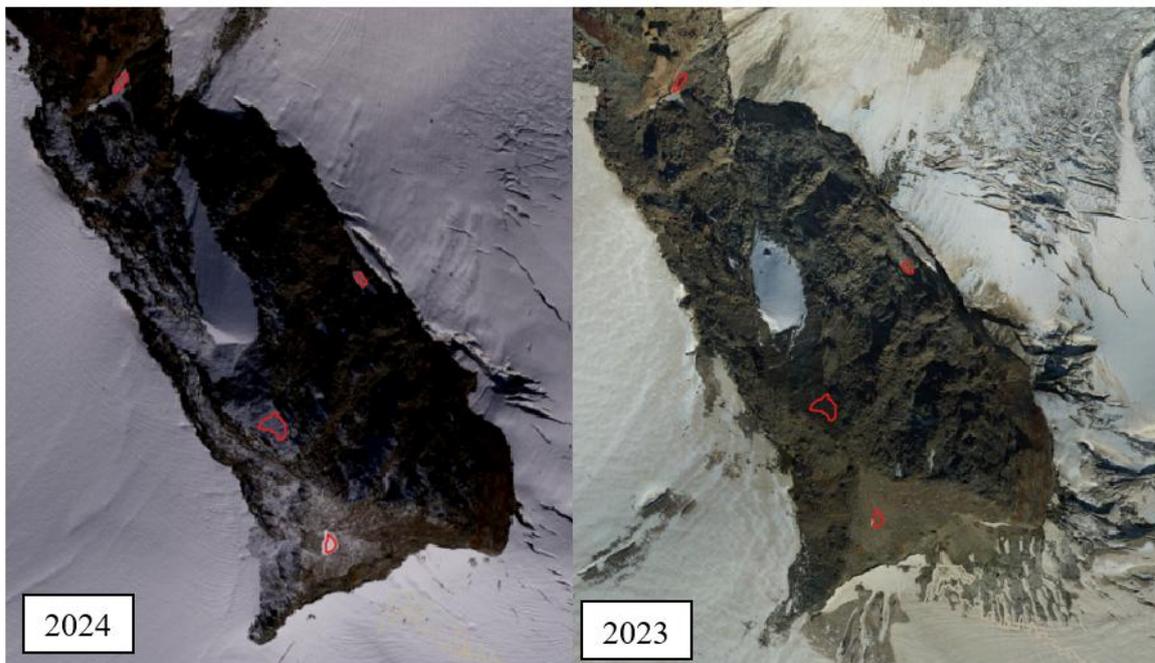


Figura 151: Aree selezionate su Vedette, 2024 con neve, 2023 senza neve

Ponendo una soglia del 5% i risultati hanno mostrato una media di accumulo di 0.46 m e una deviazione standard di 0.699m, rendendo il dato fortemente variabile. Si ricorda che la precisione del DoD calcolata nel capitolo 4.4 rivela un LoD (95%) di circa 20 cm. Il risultato rispecchia l'innalzamento rilevato nel bacino di accumulo del ghiacciaio, ponendo il dubbio se questo sia effettivamente considerabile come un processo di accumulo permanente o solo come un processo di accumulo nevoso. Per questo segue un'analisi delle temperature.

6. ANALISI DEGLI ANDAMENTI DI TEMPERATURA NEL PERIODO STRUMENTALE 2020-2024

Con la finalità di comprendere la variabilità morfologica del ghiacciaio, e quanto i processi di accumulo e ritiro siano rappresentativi e non deviati da condizioni meteo specifiche del momento temporale di acquisizione dei dati, si è svolta un'analisi degli andamenti delle temperature nel quinquennio. Si sono messi a confronto gli andamenti delle temperature per ogni anno, e si sono analizzati i valori minimi registrati nei periodi antecedenti i rilievi. I dati utilizzati sono stati scaricati dal dataset “Climate data store” che rende disponibili il download di vari fattori meteo-climatici dal 1940 ad oggi. Le temperature analizzate risalgono al modello climatico ERA 5, che utilizza dati di origine satellitare ricampionati con l'utilizzo di dati sito-specifici. Questo metodo ha permesso di sopperire la mancanza di dati in loco dovuta a disfunzioni della stazione meteo installata, ma si ricorda che il modello climatico ha una risoluzione spaziale maggiore di quella del ghiacciaio (GSD 31 Km) e valido solo per un'analisi qualitativa e non quantitativa. I risultati di correlazione attribuiti tra stazioni meteo e dato ERA5 sono solitamente molto alti, ma in contesti montani il modello climatico amplifica i valori estremi. (Velikou, et al., 2022). Le temperature medie giornaliere in analisi sono calcolate dalla media sulle 24 ore delle temperature orarie.

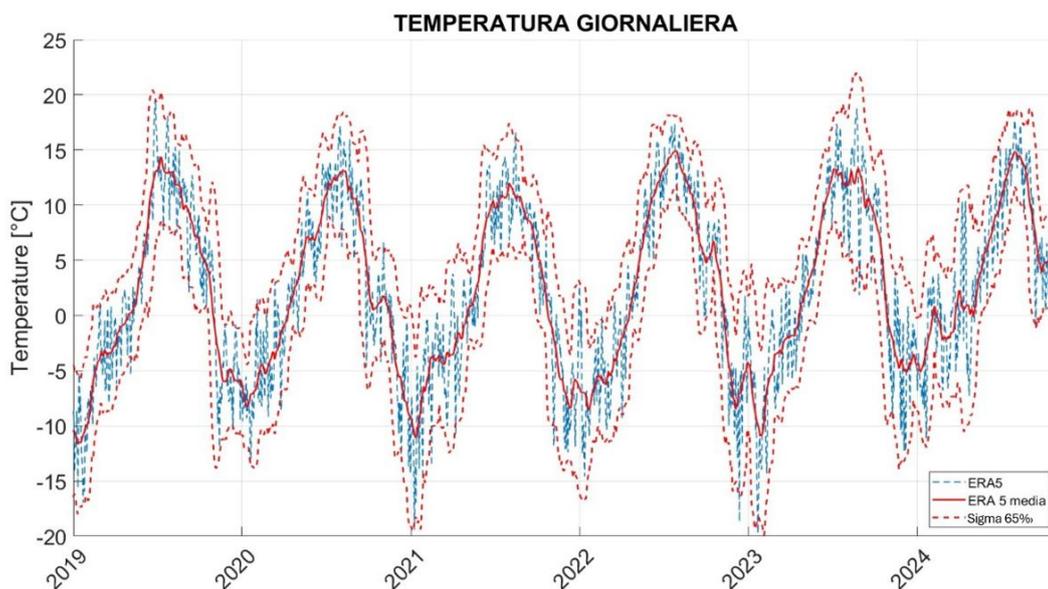


Figura 152: Andamento delle temperature giornaliere scaricate mediante il modello ERA5 su tutto il quinquennio

Dall'andamento delle temperature complessivo si può notare che alcuni anni sono soggetti a maggiori fluttuazioni, specialmente nell'estate 2023 e nell'inverno a cavallo tra il 2022 e il 2023. L'annata 2021 che nelle analisi precedenti si rivela la peggiore, non presenta temperature più alte nel periodo estivo, ma forti fluttuazioni in quello invernale. Inoltre si nota che durante tutti gli inverni in analisi le temperature superano soventemente gli 0 °C, quindi i forti abbassamenti di quota del ghiacciaio non sono dovuti solo ai processi di fusione ma anche dalla mancanza di precipitazione solida in quota.

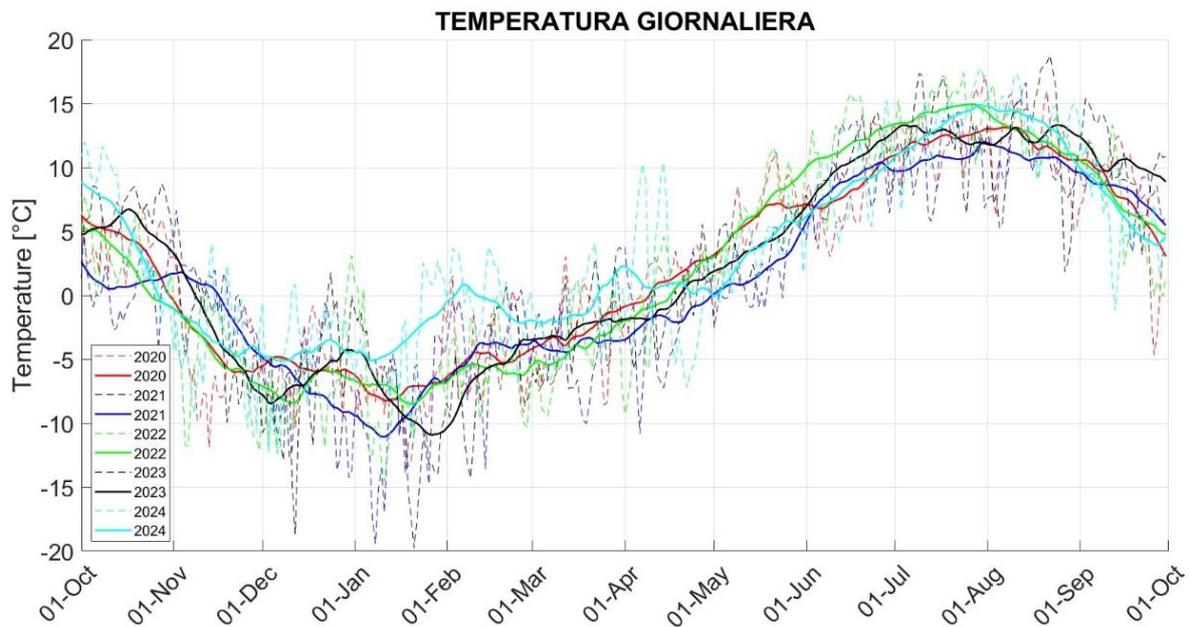


Figura 153: Confronto degli andamenti annuali delle temperature giornaliere scaricate mediante il modello ERA5 durante il quinquennio

Dal confronto più specifico delle varie annate si può notare che l'inverno ed estate 2024 è caratterizzato dalle temperature maggiori. L'annata 2022 rileva le temperature maggiori durante il periodo primaverile fino agli inizi di Agosto. Le annate 2023 e 2021 sono le migliori, tranne per un innalzamento nel 2023 durante il periodo dei rilievi Digisky.

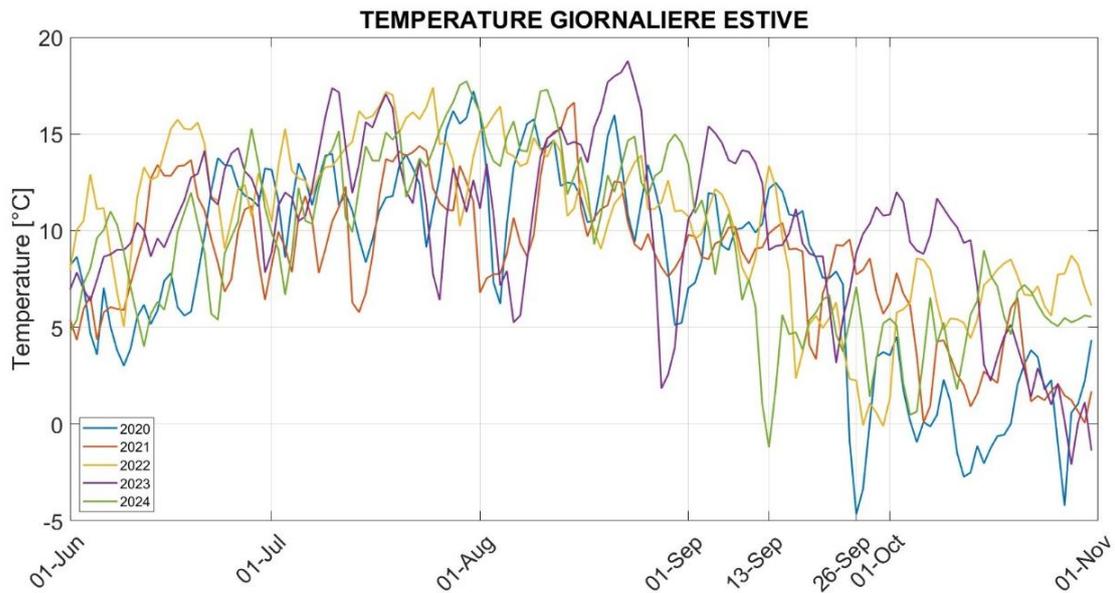


Figura 154: Confronto degli andamenti estivi delle temperature giornaliere scaricate mediante il modello ERA5 durante il quinquennio

Per comprendere meglio l'origine del manto nevoso visibile dalle ortofoto si sono analizzate le temperature prossime ai rilievi, valutando così possibili precipitazioni solide durante i periodi antecedenti i rilievi. Si sono verificati abbassamenti di temperatura il 13 settembre 2024 e il 26 settembre 2020, ma entrambi sono successivi ai rilievi svolti in quelle annate. Per cui si presume che il processo di accumulo del 2024 sia dovuto a precipitazioni antecedenti l'estate, come anche il manto nevoso visibile nelle ortofoto 2020 e 2022.

In ogni caso, per svolgere un'analisi più rappresentativa dell'origine dei processi di accumulo ed ablazione, come già anticipato nel cap. 3, si dovrebbe tener conto, oltre che alle temperature anche dei venti, di una caratterizzazione dell'aerosol trasportato, delle precipitazioni solide e liquide.

I codici di calcolo scritti per l'analisi delle temperature sono disponibili nello script 7 nella sezione finale "Script".

7. CALCOLO DELLO SPOSTAMENTO DEI CREPACCI MEDIANTE PROCESSI DI AUTOCORRELAZIONE

7.1. Introduzione

La graduale riduzione delle masse glaciali è accompagnato da un continuo movimento verso valle a causa dell'appoggio dello stesso su una superficie inclinata. Tuttavia la sollecitazione della massa non è distribuita uniformemente, è generalmente ridotta in profondità e maggiore in superficie. La parte inferiore nello scorrere si deforma mentre la parte superiore è spinta dal ghiaccio inferiore e aumenta la velocità di movimento, flettendosi e formando delle fratture chiamate 'crepacci'. I crepacci sono generalmente legati alla morfologia del bedrock sottostante la massa glaciale e sono fortemente variabili. Il monitoraggio dei crepacci e del loro spostamento fornisce informazioni sulla stabilità del ghiacciaio, sulle previsioni di eventuali crolli e sulla possibilità di passaggio per chi lavora sul campo e per gli alpinisti.

La finalità del programma trattato nel capitolo 7 è di creare un processo semi-automatico che riconosca il crepaccio in vari anni di acquisizione, calcolandone la distanza percorsa note le coordinate iniziali e finali.

Per il sistema di identificazione automatica si è utilizzato il metodo di autocorrelazione, adottato per la ricerca dei punti omologhi nel campo della fotogrammetria digitale, che permette di restituire un risultato non soggettivo per fotointerpretazione, ma basato su un processo statistico.

7.2. Algoritmo di Autocorrelazione a pixel intero

Gli algoritmi di autocorrelazione sono un'operazione statistica che simula il processo fisico di collimazione stereoscopica (matching technique). Tali processi sono applicati con due possibili approcci: l'approccio a pixel intero e l'approccio a sub-pixel; e nell'algoritmo implementato è utilizzato solo l'approccio a pixel intero. Nell'algoritmo implementato il calcolatore confronta la radiometria di due immagini mediante l'estrazione di una sottomatrice, detta "matrice sagoma" e centrata nel target di ricerca (crepaccio nella posizione iniziale) e l'individuazione di una "matrice bersaglio", che lo identifica nella posizione finale. Il riconoscimento è basato sul calcolo della

matrice di varianza-covarianza e dell'indice di correlazione lineare tra le matrici sagoma e bersaglio appena citate. Il processo di ricerca e traslazione è tradotto nell'algoritmo con un doppio ciclo "for" applicato sull'immagine in cui è presente il target nella posizione finale. Affinché il processo di calcolo sia corretto è necessario che le matrici sagoma e bersaglio abbiano le stesse dimensioni e che siano georiferite allo stesso sistema di riferimento.

L'equazione del calcolo dell'indice di correlazione è la seguente:

$$\rho_{matrice_{sagoma},matrice_{ricerca}} = \frac{\sigma_{matrice_{sagoma},matrice_{ricerca}}}{\sigma_{matrice_{sagoma}}\sigma_{matrice_{ricerca}}}$$

$$\rho_{matrice_{sagoma},matrice_{ricerca}} = \frac{\sum_{i=1}^n (g_{si} - \bar{g}_s)(g_{ri} - \bar{g}_r)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (g_{si} - \bar{g}_s)^2 (g_{ri} - \bar{g}_r)^2}}$$

Dove:

$\rho_{matrice_{sagoma},matrice_{ricerca}}$ = indice di correlazione delle matrici sagoma e bersaglio

$\sigma_{matrice_{sagoma},matrice_{ricerca}}$ = covarianza delle matrici sagoma e bersaglio

$\sigma_{matrice_{sagoma}}$ = deviazione standard matrice sagoma

$matrice_{ricerca}$ = deviazione standard matrice ricerca

g_{si} = valori radiometrici dei pixel della matrice sagoma

\bar{g}_s = media dei valori radiometrici della matrice sagoma

g_{ri} = valori radiometrici dei pixel della matrice ricerca

\bar{g}_r = media dei valori radiometrici della matrice ricerca

7.3. Metodo di rappresentazione dei crepacci

Per la definizione delle matrici sagoma e bersaglio si sono utilizzati sia l'ortomosaico, sia i DSMs generati dai rilievi aerei effettuati dalla società Digisky. Inizialmente si è provato ad utilizzare l'algoritmo di autocorrelazione direttamente sul file Raster ortofoto, per ogni banda nel visibile. Il metodo basato solo sul dato visibile RGB risulta inefficace nel momento in cui i rilievi presentano differenti coperture nevose, una variazione delle forme dei crepacci o ombreggiature differenti perché eseguiti con diverse condizioni di illuminazione. Per questo motivo è stato studiato un altro metodo più consistente per la rappresentazione ed identificazione dei crepacci.

Da qui si è introdotto l'utilizzo dei DSMs (per gli anni 2022 e 2023 per il caso studio in oggetto) ed un'analisi statistica dei campioni dei corrispettivi DoD (calcolato come $DSM\ 2023 - DSM\ 2022$) (figura 158). Come visibile in Figura 155 e 156, la differenza tra DSM con il movimento dei crepacci è soggetta sempre a questo comportamento: la sezione A è caratterizzata dai valori di DoD appartenenti alla parte centrale della distribuzione dei valori di differenza di quota, la sezione B è caratterizzata da un brusco aumento dei valori che risultano positivi, la sezione C è caratterizzata dai valori appartenenti alla coda negativa della distribuzione dei valori, e la sezione D torna ad avere lo stesso comportamento della sezione A. Per cui mediante l'introduzione di soglie nella distribuzione cumulata dei valori del DoD (figura 156) è stato possibile rappresentare le sezioni B e C generando due immagini di lavoro per l'algoritmo, delle stesse dimensioni del DoD e quindi dei DSMs, e rappresentanti il crepaccio nei due momenti temporali differenti.

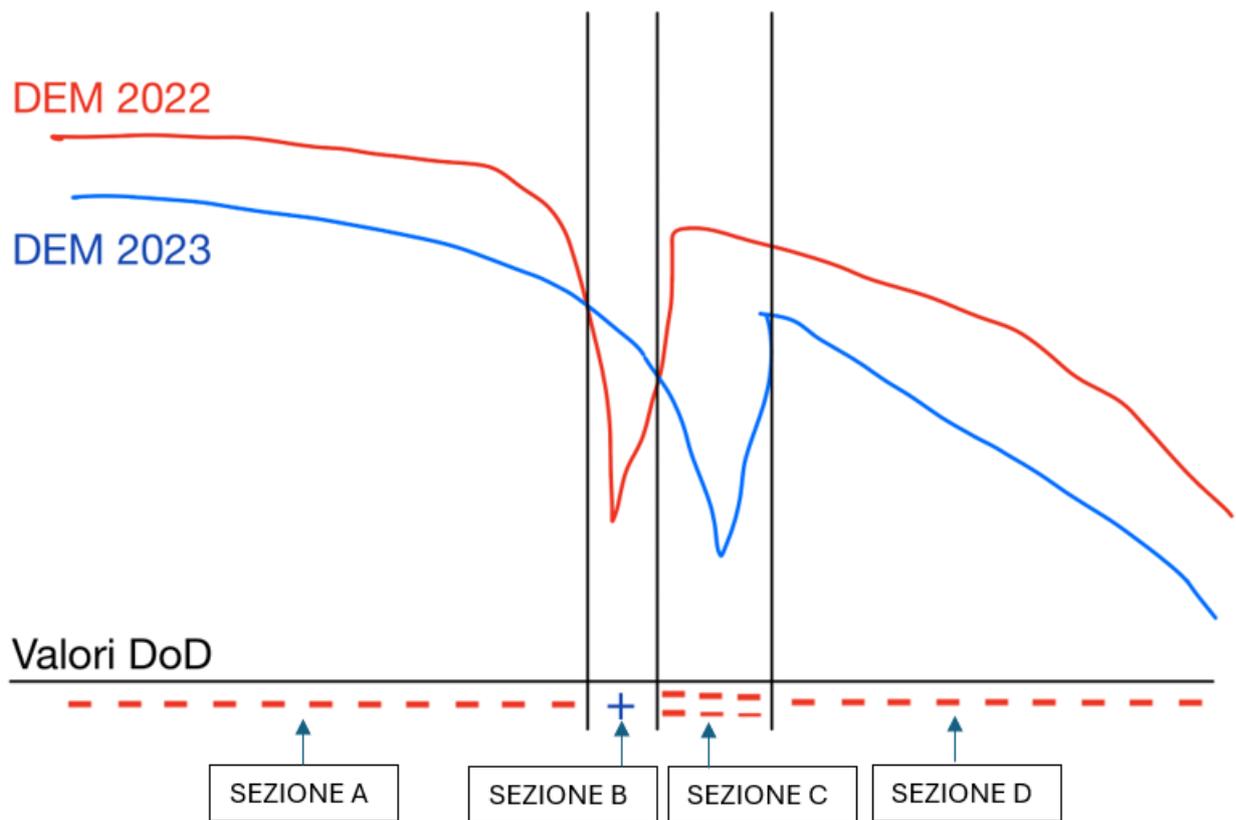


Figura 155: Rappresentazione del movimento dei crepacci mediante l'utilizzo dei DSMs e DoD. I valori del DoD nella sezione B sono positivi, i valori del DoD nella sezione C sono negativi.

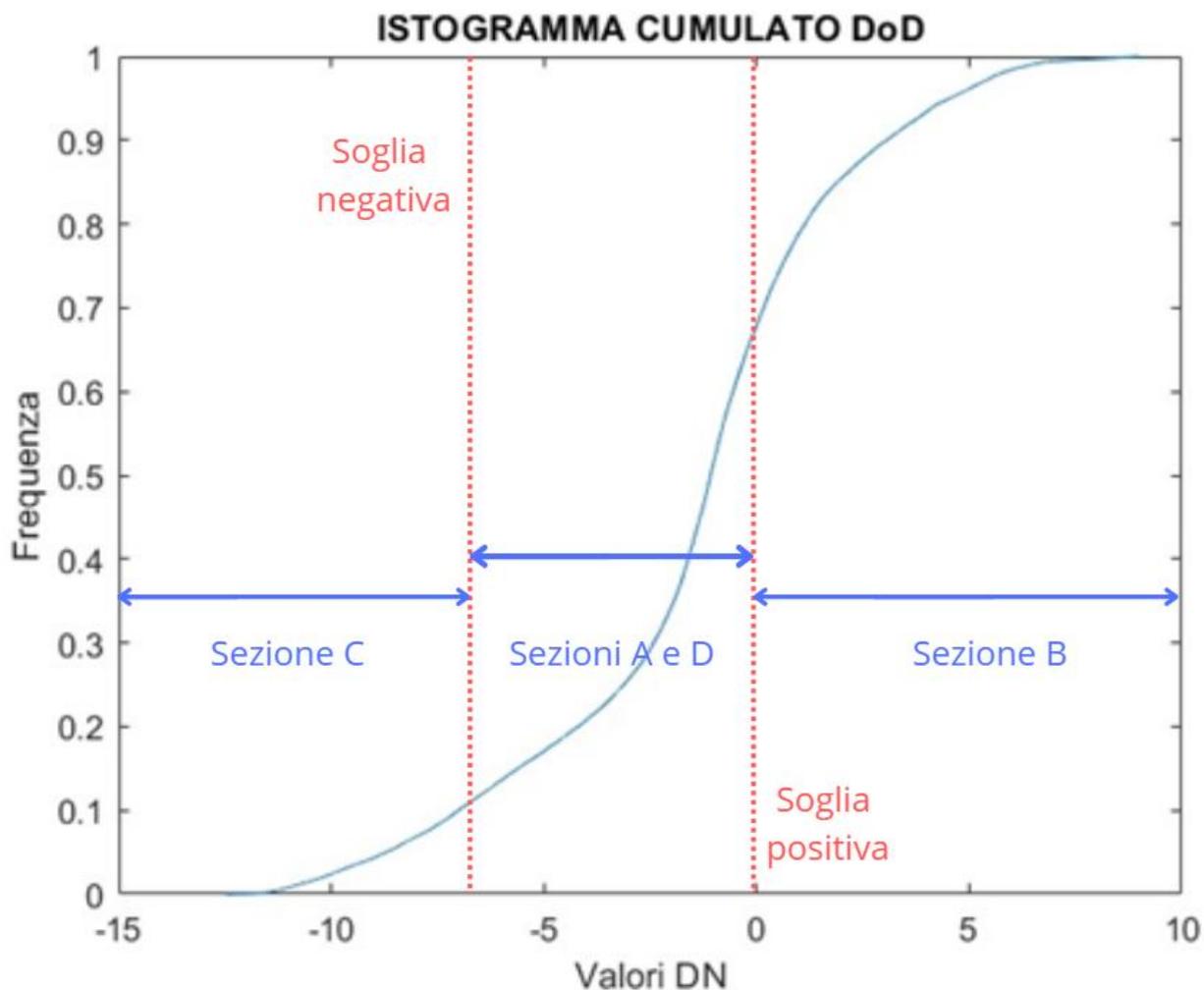


Figura 156: Istogramma cumulato della differenza tra DSMs, con soglie per la rappresentazione del crepaccio nella posizione iniziale e finale. Sono rappresentate in blu le sezioni spiegate nella Figura 155.

Il procedimento viene proposto rappresentando il DoD con una immagine in bianco e nero (1 bit, 2 valori di Digital Number (DN)) oppure a 256 toni di grigio (8 bit, 256 valori di DN) che suddividono in intervalli uguali i valori di DoD delle sezioni B e C. Da esse vengono generate due immagini: nella prima sono rappresentati i valori positivi e superiori ad una prefissata soglia (sezione B), e quindi il crepaccio nella sua posizione iniziale; nella seconda sono rappresentati i valori negativi e al di sotto di una prefissata soglia (sezione C) e che rappresenta il crepaccio nella posizione finale (Figura 157).

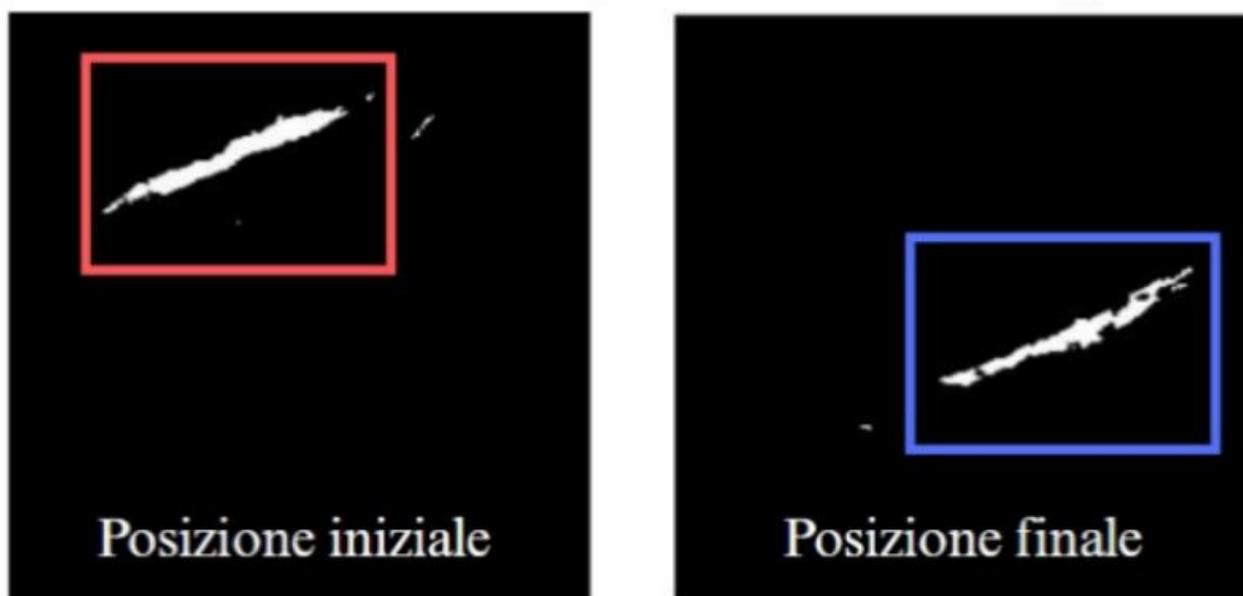


Figura 157: Rappresentazione binaria del crepaccio nella posizione iniziale (Sezione B) e finale (Sezione C) mediante le due immagini di lavoro generate dal DoD. Il riquadro rosso rappresenta la matrice sagoma, il riquadro blu rappresenta la matrice bersaglio.

Dalla prima immagine verrà estratta la “matrice sagoma” e dalla seconda la “matrice bersaglio”. Questo permette di apprezzare nel processo di autocorrelazione non solo la forma planimetrica del crepaccio, ma anche la disposizione delle variazioni altimetriche nello spazio. In entrambi i casi il valore nullo è stato posto nelle zone dove non è presente il crepaccio. Inoltre, data la necessità di riscontri delle immagini generate dall’utente mediante l’imposizione delle soglie, si è cercato di rendere il programma più interattivo possibile, aggiungendo sezioni di conferma nel processo di calcolo (Figura 160). Inoltre, per avere due immagini di lavoro migliori è necessario ritagliare dai file DSMs solo le aree dei crepacci e di lasciare spazio alla matrice sagoma di traslare per la ricerca della matrice bersaglio. L’estrazione è stata fatta con l’utilizzo del software QGIS con il tool “Clip Raster by mask layer” (Figura 158) che permette di ottenere un ritaglio del DSM imponendo come contorno una polilinea.

Nel programma è possibile generare più immagini sagoma dalla stessa immagine di partenza permettendo la ricerca di più crepacci nella stessa immagine bersaglio. Una volta generate le matrici sagoma l’algoritmo ne salva la posizione dell’origine (angolo in alto a sinistra) rispetto all’origine della matrice di partenza. L’algoritmo è stato applicato in due zone differenti del ghiacciaio, la prima su un solo crepaccio, la seconda su 3 crepacci contemporaneamente (figura 159).

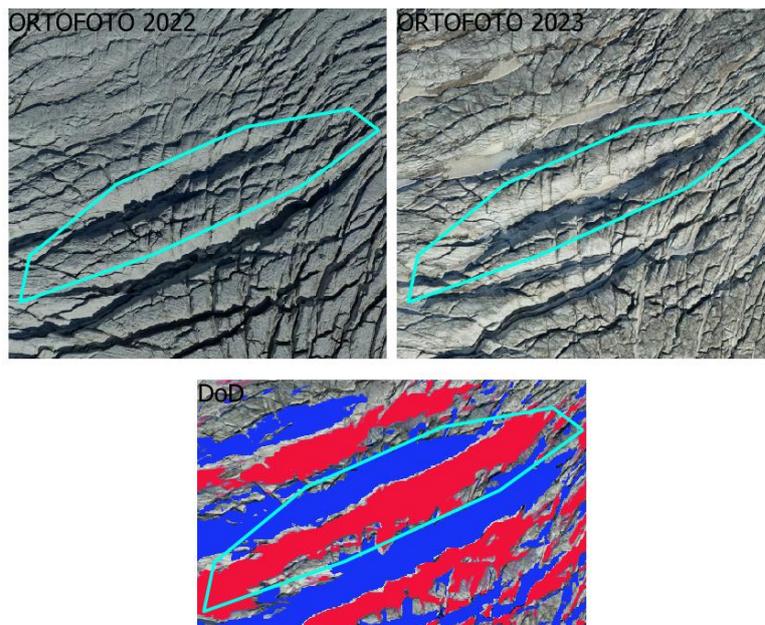


Figura 158: Ortofoto 2022 e 2023, e rappresentazione dei crepacci mediante soglie applicate al DoD, per la stima degli spostamenti di un solo crepaccio.

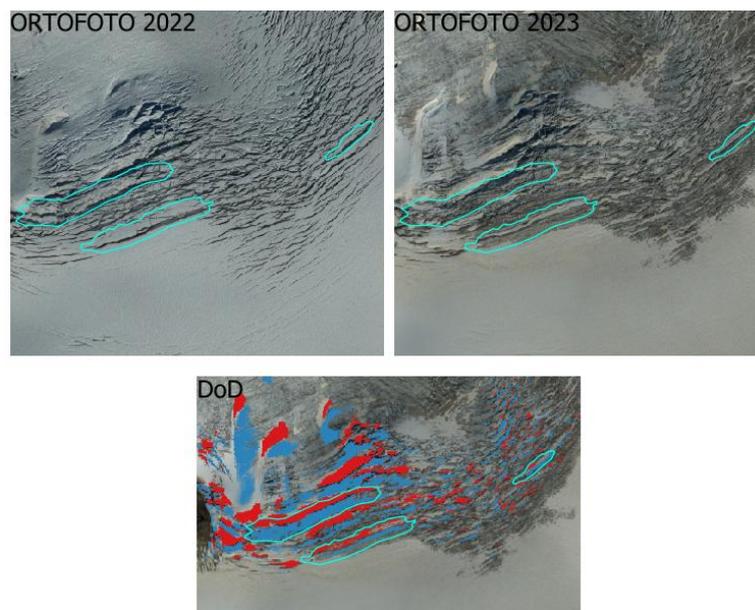


Figura 159: Ortofoto 2022 e 2023, e rappresentazione dei crepacci mediante soglie applicate al DoD, per la stima degli spostamenti dei 3 crepacci.

Per chiarire i passaggi del programma implementato è visibile il processo di lavoro nella Figura 160.

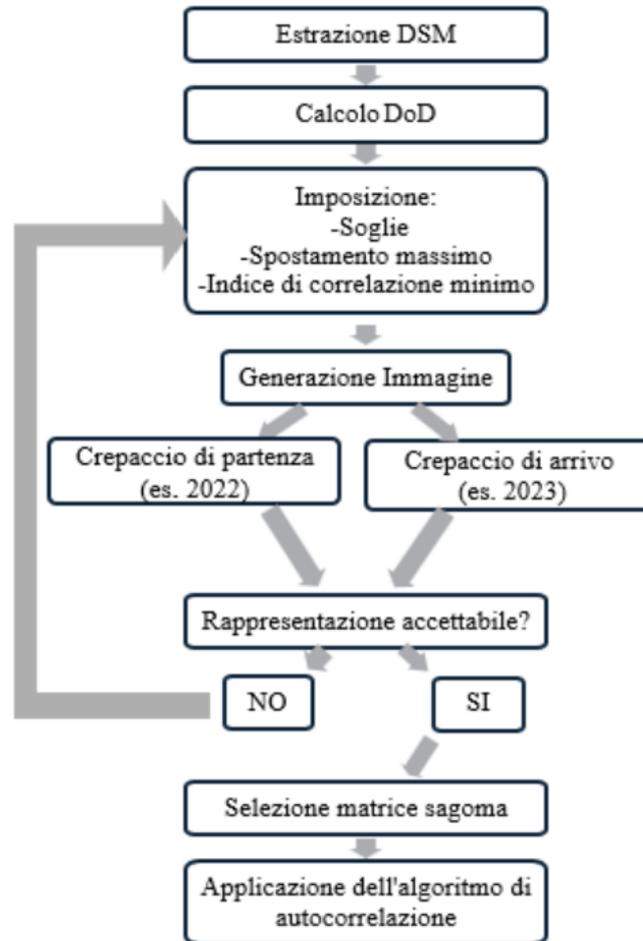


Figura 160: Passaggi del programma implementato su Matlab

7.4. Applicazione dell'algoritmo di autocorrelazione e ottimizzazione del processo di calcolo.

Una volta definita la matrice sagoma, nel processo di ricerca il programma calcola l'indice di correlazione tra la matrice sagoma e la matrice bersaglio solo se la distanza tra l'origine delle matrici è minore dello spostamento massimo preimpostato, questo permette di accelerare i tempi di calcolo. Inoltre il programma salva il risultato solo se l'indice di correlazione calcolato è maggiore di un valore minimo preimpostato, memorizzando così un numero inferiore di dati (Figura 163). Una volta analizzate tutte le possibili coppie di matrice sagoma e matrici di ricerca, il programma restituisce le matrici con le quali si è calcolato l'indice di correlazione massimo, con le informazioni di spostamento EST, NORD tra le origini delle matrici. Un ulteriore elemento da considerare è la direzione di traslazione della matrice sagoma, che influenza l'ordine con cui si visualizzano le più matrici bersaglio caratterizzate dallo stesso indice di correlazione massimo. Per

cui lo spostamento finale stimato è una media degli spostamenti della prima e dell'ultima matrice bersaglio identificata nella traslazione (Figure 161 e 162).

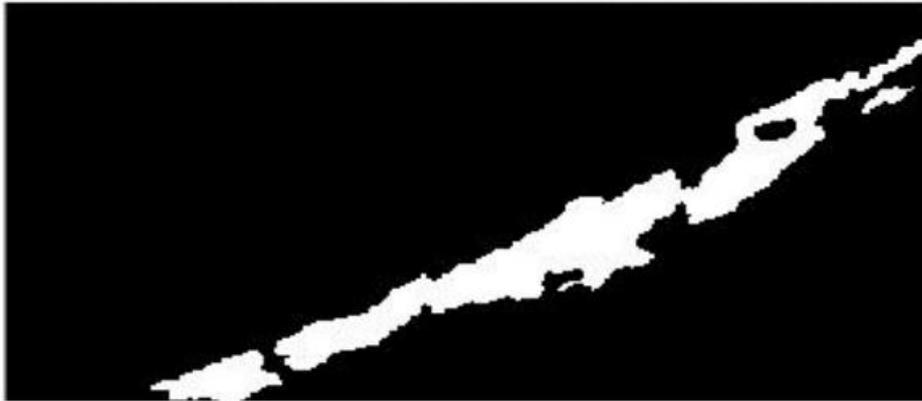


Figura 161: Prima immagine bersaglio 1 bit identificata dal programma nel processo di traslazione della matrice sagoma.

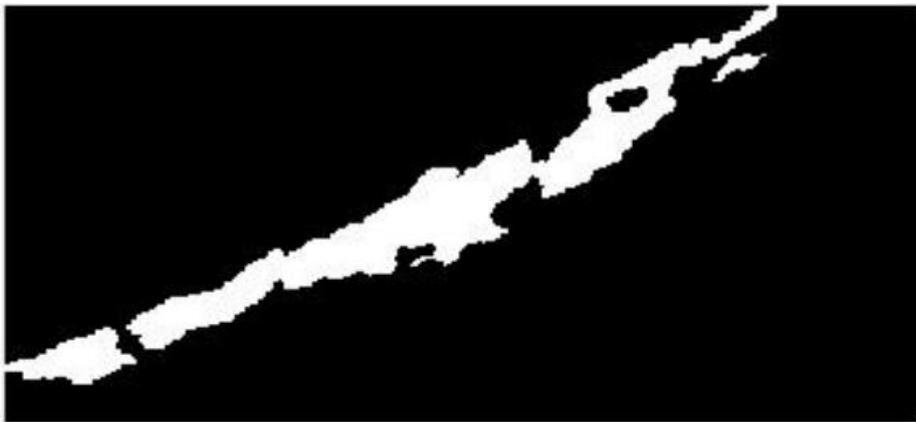


Figura 162: Ultima immagine bersaglio 1 bit identificata dal programma nel processo di traslazione della matrice sagoma.

Il programma permette la visualizzazione di 2 matrici bersaglio per ogni matrice sagoma, al fine di comprendere quanto i due risultati si discostino tra loro e se sono coerenti nel rappresentare il crepaccio.

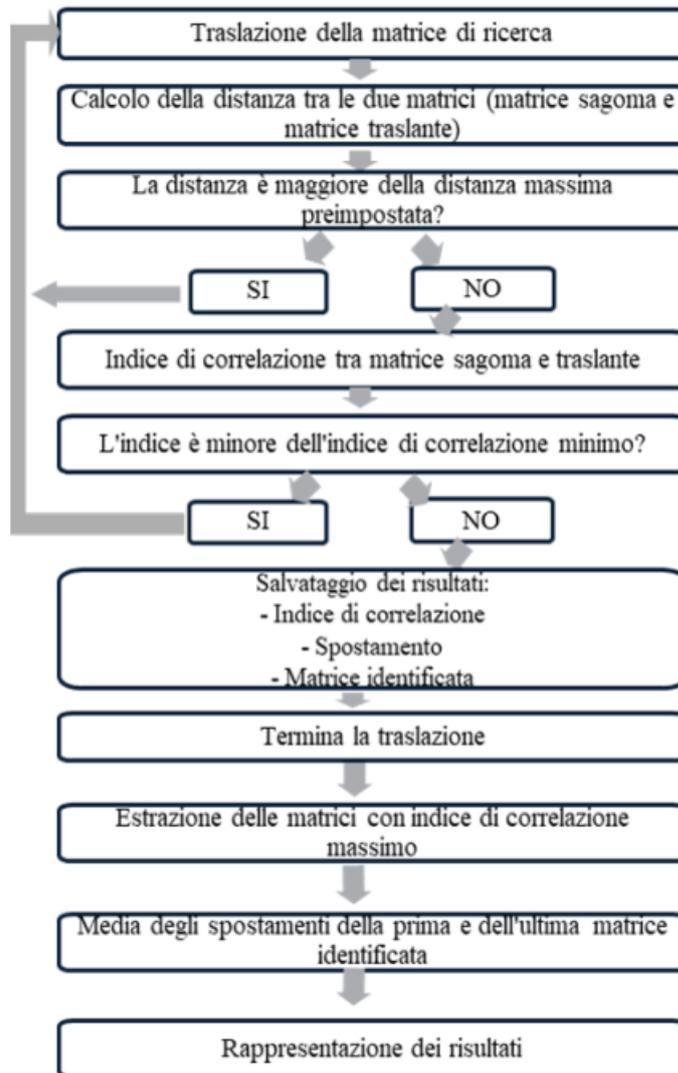


Figura 163 : Passaggi dell' algoritmo di autocorrelazione a pixel intero implementato su Matlab e applicato al caso dei crepacci.

Nei test iniziali dell' algoritmo, è fondamentale cercare di posizionare il crepaccio il più centrale possibile nella matrice sagoma, perché questo imposta il punto di origine da cui è calcolato lo spostamento. Nella Figura 164 è visibile la matrice sagoma selezionata dall'utente dove il puntino rosso centrale deve essere al centro del crepaccio.

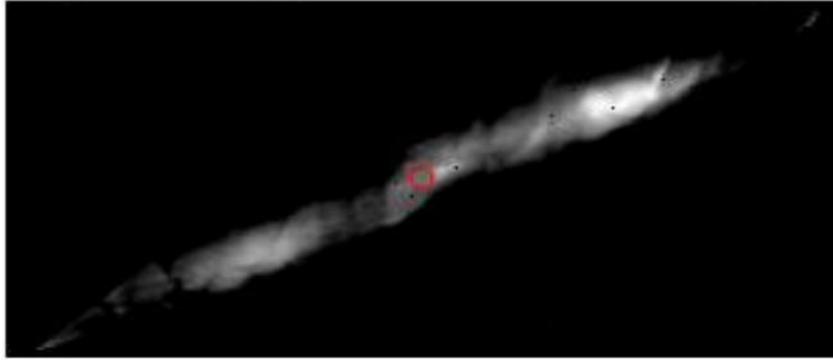


Figura 164: Immagine Sagoma 8 bit per l'identificazione del crepaccio nella posizione iniziale

Inoltre, mancando un pattern variabile nei pressi dei crepacci è utile tracciare la matrice sagoma il più piccola possibile intorno al crepaccio, rendendo così più rappresentativo il campione radiometrico della matrice sagoma con la radiometria generata dalla presenza del crepaccio, diminuendo i valori nulli nel campione. Per meglio comprendere l'efficacia del programma implementato si è applicato l'algoritmo variando gli intervalli delle soglie del DoD mediante due prove differenti denominate prova 1 e prova 2. Per l'esecuzione della terza prova si sono mantenuti gli stessi valori di soglia della prova 2 per comprendere se i risultati sono consistenti. La differenza tra le due prove è la matrice sagoma che è definita dall'utente ad ogni esecuzione del programma (Tabella 2). Inoltre impostando soglie sempre più elevate si tende a stimare lo stesso spostamento usando sia immagini a 1 bit sia a 8 bit. Se lo spostamento calcolato dall'algoritmo risulta simile allo spostamento massimo, potrebbero esserci matrici bersaglio con indici di correlazione maggiori non prese in considerazione perché a distanze superiori di quello limite preimpostato, per cui, nel verificarsi di questa condizione, si consiglia di aumentare lo spostamento massimo preimpostato.

	PROVA 1	PROVA 2	PROVA 3
GSD [m]	0.5	0.5	0.5
Indice di correlazione min.	0.5	0.5	0.5
Spostamento max [m]	50	50	50
Soglia positiva [m]	3	4	4
Soglia negativa [m]	-8	-9	-9

Tabella 21: Impostazioni di rappresentazione del crepaccio mediante soglie del DoD e valori preimpostati di spostamento massimo e di indice di correlazione minimo.

7.5. Risultati

7.5.1. Applicazione dell'algoritmo su un solo crepaccio

Nel seguente capitolo sono descritti i risultati di 4 differenti prove dell'algoritmo: le prime tre su un solo crepaccio, in cui si sono modificati i parametri soglia di rappresentazione (Tabella 2) del DoD (Figura 156) al fine di comprendere la variabilità nella stima dei risultati; l'ultima prova è eseguita su un gruppo di 3 crepacci contemporaneamente (Tabella 4). Nella Tabella 22 sono messi a confronto i risultati stimati dall'applicazione dell'algoritmo su un solo crepaccio.

	PROVA 1	PROVA 2	PROVA 3
RISULTATI 1 bit			
Spostamento EST [m]	14.25	21.25	10.5
Spostamento NORD [m]	-5.5	-7.75	-10.5
Spostamento risultante [m]	15.27	22.61	14.84
Indice di correlazione max	0.89	0.85	0.85
RISULTATI 8 Bit			
Spostamento EST [m]	14.25	21.25	10.5
Spostamento NORD [m]	-5.5	-7.75	-10.5
Spostamento risultante [m]	15.27	22.61	14.84
Indice di correlazione max	0.98	0.98	0.98

Tabella 22: Risultati dell'applicazione dell'algoritmo su un solo crepaccio mediate le prove 1,2 e 3

Gli spostamenti calcolati con i metodi 1 bit e 8 bit coincidono, come è evidente in Tabella 22. Inoltre le differenze dei risultati delle prove 2 e 3 sono dovuti a diverse coordinate d'origine e diverse dimensioni delle matrici sagoma e non per la variazione delle soglie preimpostate.

- **Prova 1**

La prova 1 è il risultato dell'applicazione dell'algoritmo su un solo crepaccio con l'imposizione di valori soglia al DoD pari a $-8m$ e $+3m$, come da Tabella 22. Gli spostamenti stimati sono visibili nelle Figure 167 e 168, e risultano $15.27m$. Gli indici di correlazione massimi calcolati sono 0.89 per il caso 1 bit e 0.98 per il caso 8 Bit.

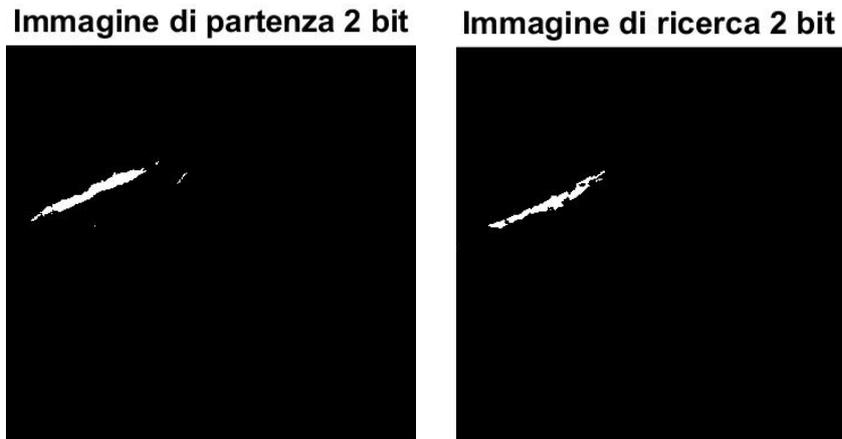


Figura 165: Rappresentazione binaria del crepaccio nella posizione iniziale (di partenza) e finale (di ricerca).

Immagine sagoma 8 Bit, Campione:1

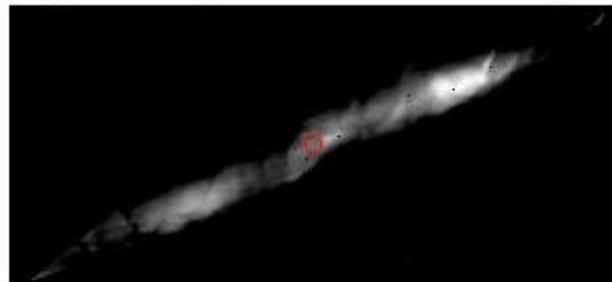


Figura 166: Immagine Sagoma per l'identificazione del crepaccio nella posizione iniziale

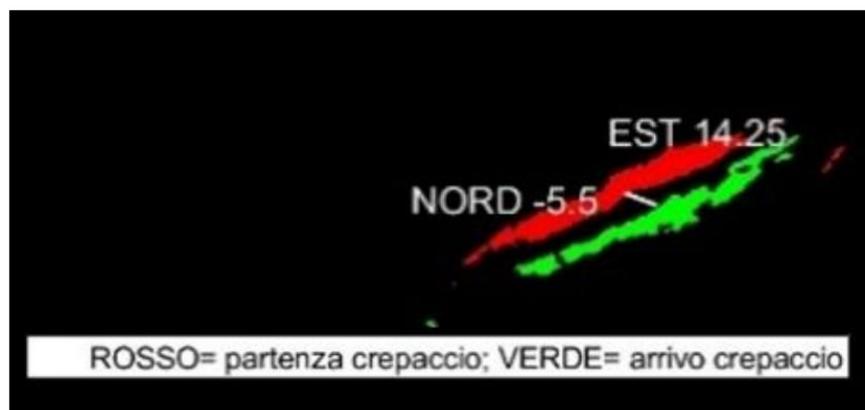


Figura 167: Prova 1: spostamenti su immagini 1 bit

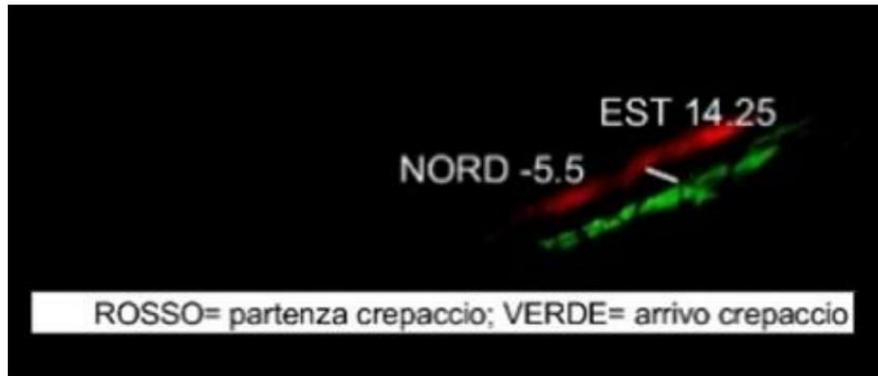


Figura 168: Prova 1: spostamenti su immagini 8 bit

- **Prova 2**

Nella prova 2 l'algoritmo di correlazione è applicato su un solo crepaccio con soglie pari a -9 m e +4 m (Tabella 22). Gli spostamenti stimati sono visibili nelle Figure 170 e 171, e risultano 22.61m. Gli indici di correlazione massimi calcolati sono 0.85 per il caso 1 bit e 0.98 per il caso 8 Bit

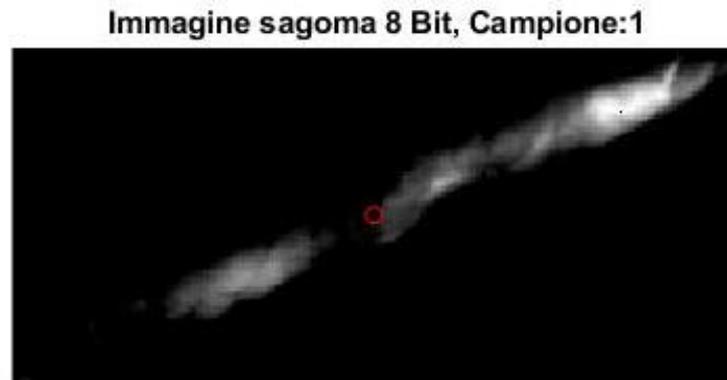


Figura 169: Immagine Sagoma per l'identificazione del crepaccio nella posizione iniziale



Figura 170: Prova 2: spostamenti su immagini 1 bit



Figura 171: Prova 2: spostamenti su immagini 8 bit

- Prova 3

Nella prova 3 l'algoritmo di correlazione è applicato su un solo crepaccio con soglie pari al caso precedente. Le differenze consistono nelle diverse matrici sagoma impostate nell'esecuzione dell'algoritmo. Gli spostamenti stimati sono visibili nelle Figure 173 e 174 e risultano 14.84m. Gli indici di correlazione massimi calcolati sono 0.85 per il caso 1 bit e 0.98 per il caso 8 Bit.

Immagine sagoma 8 Bit, Campione:1

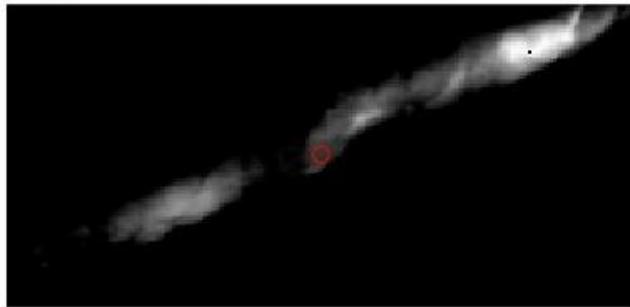


Figura 172: Immagine Sagoma per l'identificazione del crepaccio nella posizione iniziale



Figura 173: Prova 3: spostamenti su immagini 1 bit



Figura 174: Prova 3: spostamenti su immagini 8 bit

6.5.2 Applicazione dell'algoritmo su 3 crepacci

Il programma permette di analizzare più crepacci contemporaneamente. Si nota però la necessità che i crepacci siano ad una distanza maggiore della distanza di spostamento massima richiesta all'inizio del calcolo, affinché il processo di ricerca non sia influenzato dalla presenza di più crepacci e che non venga stimata una soluzione includendo parti di altri crepacci diversi da quello rappresentato nella matrice sagoma. Nella Tabella 23 e nelle Figure 177 e 178, è possibile vedere i risultati del processo di ricerca. Essendo il crepaccio 1 e 2 di dimensioni più grandi e con variazioni altimetriche maggiormente distribuite, si possono apprezzare le differenze tra l'utilizzo di immagini 1 bit e 8 bit. Il terzo crepaccio, essendo di dimensioni minori come nelle prove 1,2 e 3, non permette di riscontrare spostamenti differenti utilizzando immagini 1 bit e 8 bit.

	CREP. 1	CREP. 2	CREP. 3
GSD [m]	0.5	0.5	0.5
Indice di corr. min	0.5	0.5	0.5
Spostamento max [m]	50	50	50
Soglia positiva [m]	1.9	1.9	1.9
Soglia negativa [m]	-3.2	-3.2	-3.2
RISULTATI 1 bit			
Spostamento EST [m]	-30	-11.75	-23.5
Spostamento NORD [m]	19.5	15.5	-7.25
Risultante [m]	35.78	19.45	24.59
RISULTATI 8 Bit			
Spostamento EST [m]	-29	-17.5	-23.5
Spostamento NORD [m]	20	13	-7.25
Risultante [m]	35.23	21.8	24.59

Tabella 23: Risultati dell'applicazione dell'algoritmo su più crepacci

Immagine di partenza 2 bit



Immagine di ricerca 2 bit



Figura 175: Rappresentazione binaria del crepaccio nella posizione iniziale (di partenza) e finale (di ricerca).

Immagine sagoma 8 Bit, Campione:1

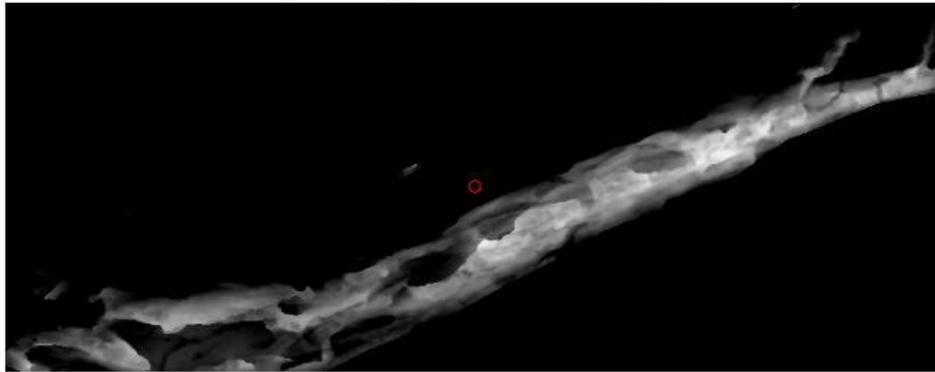


Immagine sagoma 8 Bit, Campione:2

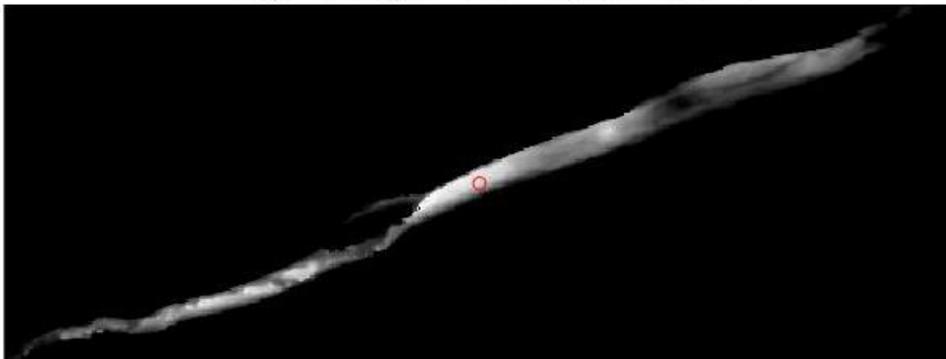


Immagine sagoma 8 Bit, Campione:3

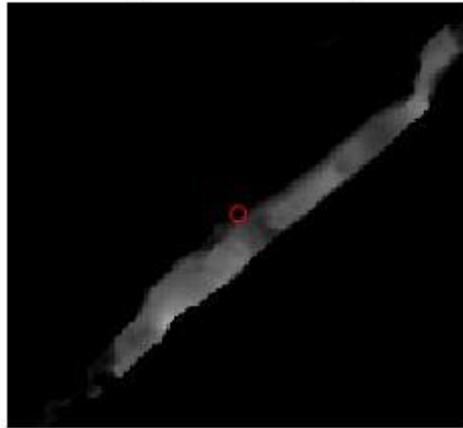


Figura 176: Immagini Sagoma per l'identificazione dei crepacci nella posizione iniziale

Risultati spostamenti 1 bit

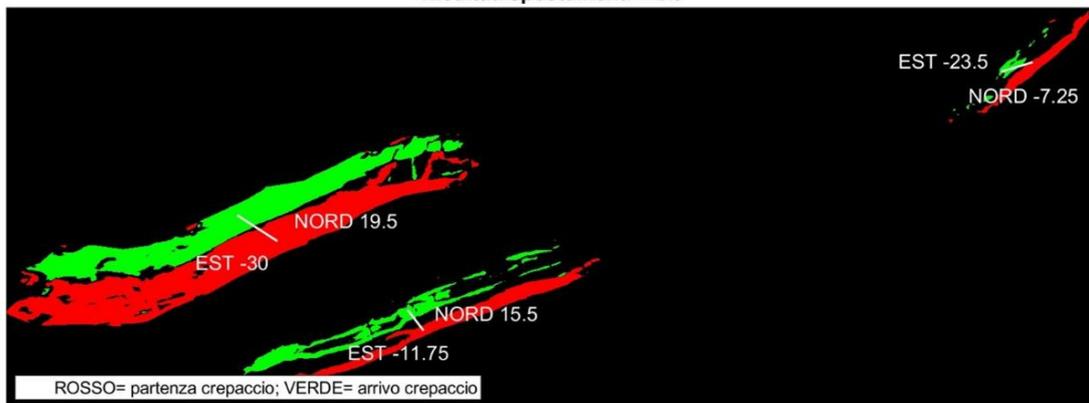


Figura 177: Spostamenti su immagini 1 bit

Risultati spostamenti 8 bit

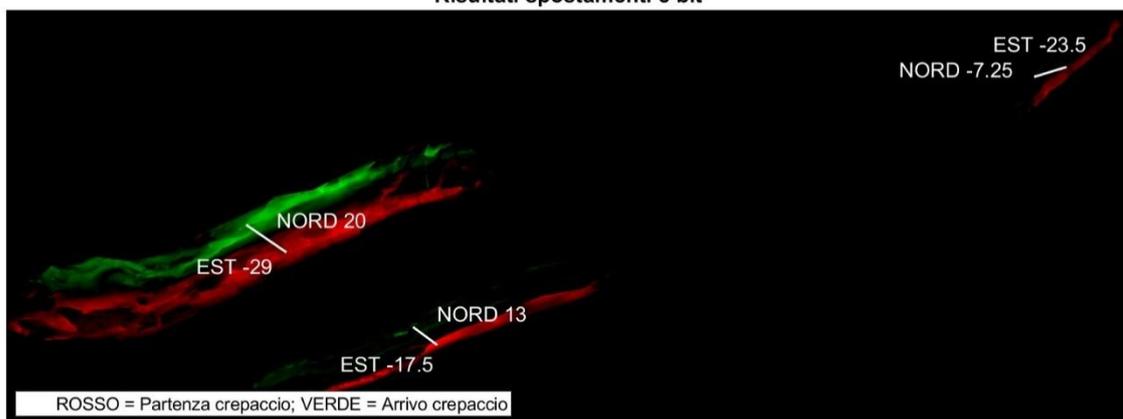


Figura 178: Spostamenti su immagini 8 bit

6.6 Analisi dei risultati

Nelle diverse prove si sono impostati gli stessi valori di soglia per la rappresentazione del crepaccio nelle diverse fasi. Si nota una variabilità dei risultati dovuta al soggettivo inquadramento della matrice sagoma sul crepaccio nella posizione iniziale e alle diverse dimensioni della matrice dovute al processo di selezione. Inoltre i risultati che risultano simili allo spostamento massimo possono non essere del tutto rappresentativi, dato che potrebbero esserci matrici bersaglio con indici di correlazione maggiori non prese in considerazione perché a distanze superiori di quella limite preimpostata. Al fine di avere un risultato più sicuro si consiglia di utilizzare l'algoritmo con un unico crepaccio, a meno che le distanze tra i crepacci in analisi siano sensibilmente maggiori rispetto a quella massima, senza avere così possibili interferenze nella identificazione della matrice bersaglio.

Come già affermato, questo processo permette di restituire un risultato non condizionato da interpretazioni personali ma unicamente determinato da un indice statistico. La variabilità dei risultati è dovuta alla generazione di matrici sagoma differenti, processo necessario per la definizione della posizione iniziale del crepaccio. Per questo si consiglia di non limitarsi ad un unico risultato, ma provare ad utilizzare più matrici sagoma, e con un'analisi a posteriori comprendere visivamente quale delle due soluzioni, 2 bit o 8 bit, è la migliore e quali prove possono essere più rappresentative dell'effettivo spostamento. Un risultato interessante è la diversa direzione di propagazione del crepaccio estratto nella zona più a valle di Vedette, che risulta spostarsi in direzione valle – monte, a differenza dei 3 crepacci ritagliati nella zona a monte di Vedette, che risultano spostarsi in direzione monte-valle.

Il passaggio successivo è trovare un modo per automatizzare il processo di inquadramento delle matrici sagoma, o di renderlo autonomo su aree più vaste. L'algoritmo in linguaggio Matlab è disponibili nella sezione finale come script 8.

8. CONCLUSIONE

Il cambiamento climatico è causa di eventi metereologici e climatici estremi e comporta forti ripercussioni sugli ecosistemi, sulla risorsa idrica, sulla salute umana, sulle economie, sulle società e popolazioni.

Come già detto in precedenza l'ambiente di alta montagna e in particolare i ghiacciai sono tra gli elementi più vulnerabili ed a rischio per la continua evoluzione del cambiamento climatico ed aumento delle temperature.

Il monitoraggio dei ghiacciai è fondamentale per le politiche di adattamento e la gestione delle risorse dei territori alpini e processi di analisi multitemporale come quelli esposti saranno necessariamente applicati in continuo nel tempo e su ampia scala.

L'analisi multitemporale è stata svolta grazie a tecniche fotogrammetriche SfM (Structure from Motion), alla base dell'odierna fotogrammetria digitale. Il remote sensing applicato in aree montane impervie, con la tecnologia fotogrammetrica, permette di acquisire grandi quantità di dati con un'elevata distribuzione spaziale, in confronto alle tecniche utilizzate in passato che richiedevano grandi sforzi per ottenere piccole quantità di dati puntuali e molte volte non rappresentativi delle reali condizioni della massa glaciale. La fotogrammetria e i suoi prodotti hanno rappresentato un'importante innovazione, migliorando significativamente l'efficacia del monitoraggio glaciale, ed a oggi rappresentano una delle tecniche più efficaci.

L'analisi multitemporale esposta nel lavoro di tesi è basata su tecniche statistiche. Si sono analizzate lungo il quinquennio: la variabilità altimetrica della massa glaciale, la variabilità volumetrica, e i diversi andamenti al variare della quota altimetrica. Si sono analizzati i processi di ritiro areale su tutto il ghiacciaio, con il tracciamento dei perimetri e si è studiato il ritiro delle due lingue principali che caratterizzano il fronte. Si sono tracciate le linee di equilibrio che hanno caratterizzato il ghiacciaio per comprenderne la forte variabilità ed in fine si è generato un algoritmo per il calcolo degli spostamenti dei crepacci mediante processi di autocorrelazione per comprendere gli spostamenti delle varie aree del ghiacciaio.

Dall'analisi del periodo strumentale 2020-2024 è chiaro come l'annata 2021-2022 sia stata la più critica, e come i processi di accumulo e di fusione che hanno caratterizzato in particolare l'annata 2023-2024, ma anche le annate 2020-2021 e 2022-2023 siano estremamente complessi e disomogenei nella distribuzione spaziale con cui si evolvono. Per questo tecniche di rilievo spaziale come quella fotogrammetrica permettono di apprezzarne l'eterogeneità spaziale e

temporale e si dimostrano estremamente validi e funzionali nel raggiungimento degli obiettivi di monitoraggio glaciale.

9. SCRIPT MATLAB

9.1. Script 1: Analisi dei profili estratti da DSM e DoD

%%% Script per il plottaggio dei profili, con possibili differenze di risoluzione spaziale.

```
clear all
```

```
clc
```

```
format long
```

```
p1_quota2020=xlsread('Profili_arretramento.xlsx','p1','N5:N3330');
```

```
p1_prog_long2020=xlsread('Profili_arretramento.xlsx','p1','M5:M3330');
```

```
p1_quota2021=xlsread('Profili_arretramento.xlsx','p1','B5:B3330');
```

```
p1_prog_long2021=xlsread('Profili_arretramento.xlsx','p1','A5:A3330');
```

```
p1_quota2022=xlsread('Profili_arretramento.xlsx','p1','E5:E3330');
```

```
p1_prog_long2022=xlsread('Profili_arretramento.xlsx','p1','D5:D3330');
```

```
p1_quota2023=xlsread('Profili_arretramento.xlsx','p1','H5:H3330');
```

```
p1_prog_long2023=xlsread('Profili_arretramento.xlsx','p1','G5:G3330');
```

```
p1_quota2024=xlsread('Profili_arretramento.xlsx','p1','K5:K3330');
```

```
p1_prog_long2024=xlsread('Profili_arretramento.xlsx','p1','J5:J3330');
```

```
p1_quota2008_pre=xlsread('Profili_arretramento.xlsx','p1','Q5:Q789');
```

```

p1_prog_long2008_pre=xlsread('Profili_arretramento.xlsx','p1','P5:P789');

dim=length(p1_quota2024);
dim_2= length(p1_quota2008_pre);
p1_quota2008=zeros(dim,1);
p1_prog_long2008=ones(dim,1);
for i=1:dim
    p1_prog_long2008(i)=p1_prog_long2024(i);
    for j=1:(dim_2-1)
        if p1_prog_long2024(i)<= p1_prog_long2008_pre(j+1) && p1_prog_long2024(i)>=
p1_prog_long2008_pre(j)
            p1_quota2008(i)= ((p1_prog_long2024(i)- p1_prog_long2008_pre(j+1))/(
p1_prog_long2008_pre(j)-p1_prog_long2008_pre(j+1)))*p1_quota2008_pre(j)-
((p1_prog_long2024(i)- p1_prog_long2008_pre(j))/( p1_prog_long2008_pre(j)-
p1_prog_long2008_pre(j+1)))*p1_quota2008_pre(j);
        end
    end
end
p1_quota2008(p1_quota2008==0)= NaN;

p1_diff2020_2008=p1_quota2020-p1_quota2008;
p1_diff2021_2020=p1_quota2021-p1_quota2020;
p1_diff2022_2021=p1_quota2022-p1_quota2021;
p1_diff2023_2022=p1_quota2023-p1_quota2022;
p1_diff2024_2023=p1_quota2024-p1_quota2023;
p1_diff2024_2008=p1_quota2024-p1_quota2008;

```

figure (1)

```
plot(p1_prog_long2008,p1_quota2008,'LineWidth',1.5,'y')
hold on
plot(p1_prog_long2020,p1_quota2020,'LineWidth',1.5,'c')
hold on
plot(p1_prog_long2021,p1_quota2021,'LineWidth',1.5,'r')
hold on
plot(p1_prog_long2022,p1_quota2022,'LineWidth',1.5,'b')
hold on
plot(p1_prog_long2023,p1_quota2023,'LineWidth',1.5,'g')
hold on
plot(p1_prog_long2024,p1_quota2024,'LineWidth',1.5,'k')
title('Profilo 1','FontSize',12)
xlabel('Progressione longitudinale [m]','FontSize',12)
ylabel('Quota [m s.l.m]','FontSize',12)
legend('2008','2020','2021','2022','2023','2024','Location','Northwest','FontSize',12)
grid on

exportgraphics(gcf,
'C:\Users\user\OneDrive\documenti\POLITO\tesi\prodotti_cartografici\profili\profili_arretramen
to\GRAFICi\p1.pdf');
saveas(gcf,
'C:\Users\user\OneDrive\documenti\POLITO\tesi\prodotti_cartografici\profili\profili_arretramen
to\GRAFICi\p1.fig');
figure (2)
grid on
```

```
plot(p1_prog_long2008,p1_diff2020_2008,'y')
hold on
plot(p1_prog_long2021,p1_diff2021_2020,'c')
hold on
plot(p1_prog_long2021,p1_diff2022_2021,'r')
hold on
plot(p1_prog_long2022,p1_diff2023_2022,'b')
hold on
plot(p1_prog_long2023,p1_diff2024_2023,'g')
hold on
plot(p1_prog_long2024,p1_diff2024_2008,'k')
title('Variazioni di quota del ghiacciaio lungo il profilo 1')
xlabel('Quota [m]')
ylabel('Variazioni di Quota [m]')
legend('2020-2008','2021-2020','2022-2021','2023-2022','2024-2023','2024-2008','Location','Northwest')
grid on
```

9.2. Script 2: Analisi statistica DoD

9.2.1. Script 2.1

Script per il calcolo dell'indice di correlazione tra DSM e per il calcolo dell'indice di correlazione dei DN dei DSM ricavati dagli OUTLIERS della differenza tra DSM con il variare del livello di significatività alpha. Si visualizzano gli OUTLIERS al variare del livello di significatività alpha. Successivamente il programma esegue una statistica di tutti i dati della differenza tra DSM, una statistica senza le code a un certo livello di significatività alpha e una statistica con la possibilità di applicare un'ulteriore soglia. È importante che i DSM rappresentino la stessa area e abbiano lo stesso GSD.

16/12/2024 @Tommaso Mainiero

clc

clear all

close all

Caricamento Dati

% Importante che entrambi i DSM rappresentino la stessa area di studio.

% E' possibile selezionare delle aree specifiche con aree vettoriali (QGIS) e

% estrapolare il raster dell'area di interesse mediante estrazione con

% maschera. I no data dei DSM sono considerati negativi, non è importante

% che ci sia una perfetta sovrapposizione dei pixel tra DSM, che a volte con

% l'utilizzo di Qgis, non è possibile con i comandi di ritaglio.

tic

disp('Load dati');

DSM_1= imread('2021_DSM_Areastabile.tif'); %%%%%%%%%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!

anno_1=2021; %%%%%%%%%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!

DSM_2=imread('2022_DSM_Areastabile.tif'); %%%%%%%%%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!

anno_2=2022; %%%%%%%%%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!

righe_1=size(DSM_1,1);

col_1=size(DSM_1,2);

righe_2=size(DSM_2,1);

col_2=size(DSM_2,2);

if righe_1 ~= righe_2 || col_1 ~= col_2

disp('I due DSM hanno dimensioni differenti')

end

toc

%% %%%%%%%%%% Calcolo indice di correlazione DSM completo %%%%%%%%%%

disp('ANALISI STABILITÀ')

disp('Indicie di correlazione DSM completo')

%%%% Vettori dati DSM

cont=1;

```

for i=1:righe_1
    for j=1:col_1
        if DSM_1(i,j)>0 && DSM_2(i,j)>0 % campioni completi

            Dati_1(cont,1)= DSM_1(i,j);
            Dati_2(cont,1)= DSM_2(i,j);

            cont=cont+1;

        end

    end

end

end

end

%%% Statistica

Dati_1=sort(Dati_1);
sqm_1=std(Dati_1);
media_1=mean(Dati_1);

Dati_2=sort(Dati_2);
sqm_2=std(Dati_2);
media_2=mean(Dati_2);
N=size(Dati_2,1);

covarianza = sum((Dati_1-media_1).*(Dati_2-media_2))/N;
indice_correlazione = covarianza/(sqm_1*sqm_2);

```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Visualizzazione Risultati campioni  
completi %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
disp(indice_correlazione)
```

```
figure(1)
```

```
imshow(DSM_1)
```

```
title(['DSM ',num2str(anno_1)])
```

```
figure(2)
```

```
imshow(DSM_2)
```

```
title(['DSM ',num2str(anno_2)])
```

```
figure(3)
```

```
set(3,'NumberTitle','off');
```

```
set(3,'Name','DEMs');
```

```
plot(Dati_1,'LineWidth',1.5)
```

```
hold on
```

```
plot(Dati_2,'LineWidth',1.5)
```

```
title('DN DEM','FontSize',19)
```

```
xlabel('Numero elementi del campione')
```

```
ylabel('DN')
```

```
grid on
```

```
legend(['Dati DEM ',num2str(anno_1)],['Dati DEM ',num2str(anno_2)],'FontSize',19)
```

```
clear indice_correlazione covarianza N media_2 Dati_2 sqm_2 Dati_1 sqm_1 media_1
```

```
% clear delle variabili calcolate
```

```
toc
```

```
%%% Calcolo indice di correlazione degli errori con il variare del livello di significatività  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
disp('Indice di correlazione dei DSM corrispondenti agli OUTLIERS definiti con il variare del  
livello di significatività')
```

```
% Differenza DSM e statistica per l'identificazione degli OUTLIERS
```

```
nodata=3.4e+38;
```

```
cont=1;
```

```
for i=1:righe_1 % DSM differenza
```

```
    for j=1:col_1
```

```
        if DSM_2(i,j)>0 && DSM_1(i,j)>0
```

```
            cont=cont+1;
```

```
            DSM_diff(i,j)=DSM_2(i,j)-DSM_1(i,j);
```

```
        else
```

```
            DSM_diff(i,j)=nodata;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
righe=size(DSM_diff,1);
```

```
col=size(DSM_diff,2);
```

```

cont_datiDiff=0;
for i=1:1:righe                                % vettore dati Diff DSM
    for j=1:1:col
        if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata)
            cont_datiDiff=cont_datiDiff+1;
            datiDiff(cont_datiDiff)=DSM_diff(i,j);
        end
    end
end

datiDiff=sort(datiDiff);
freq_diff=zeros(1,size(datiDiff,2));          % Visualizzo frequenze cumulate

for i=1:size(datiDiff,2)
    freq_diff(i)=i/size(datiDiff,2);
end

s_max_1=prctile(datiDiff,(100-1/2));          % livello di significatività con soglia
s_min_1=prctile(datiDiff,(1/2));

s_max_5=prctile(datiDiff,(100-5/2));          % livello di significatività con soglia
s_min_5=prctile(datiDiff,(5/2));

s_max_10=prctile(datiDiff,(100-10/2));        % livello di significatività con soglia
s_min_10=prctile(datiDiff,(10/2));

```

```

figure(4)

set(4,'NumberTitle','off');

set(4,'Name','Dati DoD');

plot(datiDiff,freq_diff,'lineWidth',2)

hold all

grid on

title('ISTOGRAMMA CUMULATO dei DN DoD','FontSize',19)

xline(s_max_1, 'r--','1%','lineWidth',1);

xline(s_min_1, 'r--','lineWidth',1);

xline(s_max_5, 'r--','5%', 'lineWidth',1.5);

xline(s_min_5, 'r--','lineWidth',1.5);

xline(s_max_10, 'r--','10%', 'lineWidth',2);

xline(s_min_10, 'r--','lineWidth',2);

xlabel('Valori DN DoD','LineWidth', 19)

ylabel('Frequenza','LineWidth', 19)

grid on

legend('Dati DoD',' Soglie con alpha 1% - 5% - 10%','FontSize',19)

% Possibilità di visualizzare gli OUTLIERS al variare di alpha

richiesta_utente=input('Vuoi visualizzare tutte le possibili immagini rappresentati gli outliers al
variare del livello di significatività alpha (y/n); ','s');

alpha_plot=[0.05;0.1;0.15;0.25;0.5;0.75;1;1.25;1.5;2;2.5;3;3.5;4;4.5;5;6;7;8;9;10;11;12;13;15;20
;30;40;45;50;75;90;100];

cont_fig=5;

```

```

indice_correlazione_compl=zeros(size(alpha_plot,1),1);
s_max_compl=zeros(size(alpha_plot,1),1);
s_min_compl=zeros(size(alpha_plot,1),1);

for ii=1:size(alpha_plot,1)
s_max_p=prctile(datiDiff,(100-alpha_plot(ii)/2));           % soglie e il livello di significatività
s_min_p=prctile(datiDiff,(alpha_plot(ii)/2));
s_max_compl(ii)=s_max_p;
s_min_compl(ii)=s_min_p;

% Vettori dati DSM correlati agli OUTLIERS

cont=1;

imm_vuota=zeros(righe_1,col_1);

num_err=0;
for i=1:righe_1
    for j=1:col_1

        if DSM_diff(i,j)>s_max_p && DSM_diff(i,j)<s_min_p

            imm_vuota(i,j)=1;

            if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata)
                num_err=num_err+1;

```

```

        end
    end

    end

    end

    for i=1:righe_1
        for j=1:col_1

            if DSM_1(i,j)>0 && DSM_2(i,j)>0 && abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata) &&
DSM_diff(i,j)>s_max_p

                Dati_1(cont,1)= DSM_1(i,j);
                Dati_2(cont,1)= DSM_2(i,j);

                cont=cont+1;
            end

            if DSM_1(i,j)>0 && DSM_2(i,j)>0 && abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata) &&
DSM_diff(i,j)<s_min_p

                Dati_1(cont,1)= DSM_1(i,j);
                Dati_2(cont,1)= DSM_2(i,j);

                cont=cont+1;
            end
        end
    end

```

```

end
end

%%% Statistica

Dati_1=sort(Dati_1);
sqm_1=std(Dati_1);
media_1=mean(Dati_1);

Dati_2=sort(Dati_2);
sqm_2=std(Dati_2);
media_2=mean(Dati_2);
N=size(Dati_2,1);

covarianza = sum((Dati_1-media_1).*(Dati_2-media_2))/N;
indice_correlazione = covarianza/(sqm_1*sqm_2);

indice_correlazione_compl(ii)=indice_correlazione;

```

```

%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%

```

Visualizzazione

Risultati

```

%figure

if strcmpi(richiesta_utente, 'y')

cont_fig=cont_fig+1;

```

```

figure(cont_fig)
imshow(imm_vuota)
title(['OUTLIERS differenza DSM con alpha: ',num2str(alpha_plot(ii)),'
',num2str((num_err/size(datiDiff,2))*100),'%'])

end

end

cont_fig=cont_fig+1;
figure(cont_fig)
set(cont_fig,'NumberTitle','off');
set(cont_fig,'Name','TEMPERATURA GIORNALIERA');
plot(alpha_plot,indice_correlazione_compl,'LineWidth',1.5)
title(['Indici di correlazione DN DEMs selezionati da OUTLIERS del DoD; ',num2str(anno_1),'-
',num2str(anno_2)],'FontSize',19)
xlabel('alpha','FontSize',19)
ylabel('indice di correlazione','FontSize',19)
hold on
grid on

cont_fig=cont_fig+1;
figure(cont_fig)
set(cont_fig,'NumberTitle','off');
set(cont_fig,'Name','SOGLIE');
plot(alpha_plot,s_min_compl,'r--','LineWidth',1.5)
hold all
plot(alpha_plot,s_max_compl,'r--','LineWidth',1.5)

```

```

title(['Soglie in funzione del livello di significatività; ',num2str(anno_1),'-
',num2str(anno_2)],'FontSize',19)

xlabel('alpha','FontSize',19)

ylabel('Soglie con alpha applicato simmetricamente','FontSize',19)

hold on

grid on

toc

%%%%%%%%%% STATISTICA DIFFERENZA DSM
%%%%%%%%%%

% Statistica con code

disp('Statistica DIFFERENZA DSM') % statistica media e sqm di tutti

mediana=median(datiDiff); % statistica su campione con soglie e senza
soglie

media=mean(datiDiff);

sqm=std(datiDiff);

disp('Statistica senza code');

% statistica media e sqm senza code

%alphadx=2.5; %%%%%%%%%%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!

%alphasx=2; %%%%%%%%%%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!

```

```

satisfied = false; % Inizializza stato di soddisfazione

while ~satisfied

alphadx=input('Inserire il valore di livello di significatività (alpha/2) da porre alla coda dx della
distribuzione: ');

alphasx=input('Inserire il valore di livello di significatività (alpha/2) da porre alla coda sx della
distribuzione: ');

alpha_def=alphasx+alphadx;

s_max=prctile(datiDiff,(100-alphadx)); % Soglie con possibile aplha non
simmetrico

s_min=prctile(datiDiff,(alphasx));

cont_fig=cont_fig+1;

figure(cont_fig)

set(cont_fig,'NumberTitle','off');

set(cont_fig,'Name','ISTOGRAMMA CUM DOD');

plot(datiDiff,freq_diff,'LineWidth',1.5)

hold all

grid on

title('ISTOGRAMMA CUMULATO dei DN appartenenti al DoD','FontSize',19)

xline(s_max, 'r--', sprintf('soglia %.2f%%', alpha_def), 'FontSize', 14);

xline(s_max, 'r--','FontSize', 14);

xlabel('Valori DN DOD','FontSize',19)

ylabel('Frequenza','FontSize',19)

x_fill_1 = [ datiDiff(1) datiDiff(1) s_min s_min]; % Coordinata X dell'area

```

```

y_fill = [0 1 1 0]; % Coordinata Y dell'area
fill(x_fill_1, y_fill, 'r', 'FaceAlpha', 0.1); % Aggiunge area rossa trasparente
x_fill_2 = [ s_max s_max datiDiff(end) datiDiff(end)]; % Coordinata X3 dell'area
y_fill = [0 1 1 0]; % Coordinata Y dell'area
fill(x_fill_2, y_fill, 'r', 'FaceAlpha', 0.1); % Aggiunge area rossa trasparente

% Chiedi conferma all'utente

userInput = input('Sei soddisfatto del campione selezionato? (y/n): ', 's');

if strcmpi(userInput, 'y')
    satisfied = true; % L'utente è soddisfatto, esce dal ciclo while
elseif strcmpi(userInput, 'n')
    disp('Ripeto la parte di script per questa iterazione...');
    % Il ciclo while continuerà, ripetendo il blocco di codice sopra
else
    disp('Risposta non valida. Inserisci "y" o "n".');
end
end

imm_vuota_fin=zeros(righe_1,col_1);

for i=1:righe_1
    % Immagine con OUTLIERS DSM_diff con
    alphadx e alphasx
    for j=1:col_1

        if DSM_diff(i,j)>s_max

```

```

    imm_vuota_fin(i,j)=1;

end

if DSM_diff(i,j)<s_min

    imm_vuota_fin(i,j)=1;

end

end

end

end

senzacode=datiDiff(datiDiff<=s_max & datiDiff>=s_min);           % Campione senza le code

                                % Media senza le code con aplha applicato al campione

for i=1:1:size(senzacode,2);

    freq_senzacode(i)=i/size(senzacode,2);

end

med_senzacode=mean(senzacode);

sqm_senzacode=std(senzacode);

```

```

v_senzacode=senzacode-med_senzacode;

m2=0;

m3=0;

m4=0;

for i=1:size(v_senzacode,2);           % Skewness e curtosi senza code
    m2=m2+v_senzacode(i)^2;
    m3=m3+v_senzacode(i)^3;
    m4=m4+v_senzacode(i)^4;
end

m2=m2/size(v_senzacode,2);
m3=m3/size(v_senzacode,2);
m4=m4/size(v_senzacode,2);

gam=m3/m2^(3/2);                       % Indice Skewness - gamma di fisher
gam2=m4/m2^2-3;                         % Indice curtosi - gamma2 di fisher

toc

%%%%%%%%%%%%%% visualizzazione          Risultati
%%%%%%%%%%%%%%

% video

disp('RISULTATI')

disp('.')

disp('alpha applicato sulla coda dx');

disp(alphadx);

disp('alpha applicato sulla coda sx');

disp(alphasx);

disp('Soglie definite dal livello di significatività alpha');

disp(senzacode(1));

```

```

disp(senzacode(end));
disp('valori sopra soglia:');
disp(size(datiDiff,2)-size(senzacode,2));
disp('% valori sopra soglia:');
disp((((size(datiDiff,2)-size(senzacode,2))*100/size(datiDiff,2)));
disp('mediana');
disp(mediana);
disp('media');
disp(media);
disp('sqm');
disp(sqm);
disp('media senza code');
disp(med_senzacode);
disp('sqm popolazione senza code');
disp(sqm_senzacode);
disp('Skewnees - indice gamma Fisher');
disp(gam);
disp('Curtosi - indice gamma2 Fisher');
disp(gam2);

%figure
cont_fig=cont_fig+1;
figure(cont_fig)
set(cont_fig,'NumberTitle','off');
set(cont_fig,'Name','DIFFERENCE OF DEMS DoD');
hold all

```

```

imshow (DSM_diff);

title(['DoD [m]', 'FontSize',19)

ylabel('Nord','FontSize',19)

xlabel('Est','FontSize',19)

%legend(['red = local redundancy < ',num2str(cut_r)], ['green = local redundancy >
',num2str(cutmax_r)],'Location','Best');

cont_fig=cont_fig+1;

figure(cont_fig)

set(cont_fig,'NumberTitle','off');

set(cont_fig,'Name','DN del DOD FUORI SOGLIA');

imshow (imm_vuota_fin);

ylabel('Nord','FontSize',19)

title(['DN del DOD FUORI SOGLIA; ',num2str(((size(datiDiff,2)-
size(senzacode,2))*100/size(datiDiff,2))), '%'], 'FontSize',19)

xlabel('Est','FontSize',19)

ylabel('Nord','FontSize',19)

cont_fig=cont_fig+1;

figure(cont_fig)

set(cont_fig,'NumberTitle','off');

set(cont_fig,'Name','ISTOGRAMMA CUMULATO FREQUENZE SENZA SOGLIE');

hold on

grid on

plot(senzacode,freq_senzacode,'LineWidth',2)

title('ISTOGRAMMA CUMULATO FREQUENZE SENZA SOGLIE' , 'FontSize',19)

ylabel('FREQUENZA','FontSize',19)

```

```
xlabel('DoD [m]',FontSize,19)
```

9.2.2. Script 2.2

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% statistica su differenza di DSM %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% statistica sulla differenza di due DSM. Richiede DSM da cui svolgere la differenza.  
% È importante che i DSM rappresentino la stessa area e abbiano la stesso  
% GSD.  
% Il programma esegue una statistica di tutti i dati, una statistica senza le code a un certo livello  
di  
% significatività alpha e una statistica con la possibilità di applicare un'ulteriore  
% soglia.  
%  
% @Alberto Cina - ultima modifica 6 luglio 2023  
% con modifica di @Tommaso Mainiero 11/2024  
  
%% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% LOAD DATI di Input  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
% Importante che entrambi i DSM rappresentino la stessa area di studio.  
% E' possibile selezionare delle aree specifiche con aree vettoriali (QGIS) e  
% estrapolare il raster dell'area di interesse mediante estrazione con  
% maschera. I no data dei DSM sono considerati negativi, non è importante  
% che ci sia una perfetta sovrapposizione dei pixel tra DSM, che a volte con  
% l'utilizzo di Qgis, non è possibile con i comandi di ritaglio.  
  
clear all  
  
close all  
  
clc  
  
tic
```

```

soglia=1000;      %%%%%%%%%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!
alpha=0.05;      %%%%%%%%%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!      %livello di significatività da
0 a 1

%soglia= input('Inserisci il valore di soglia generale: ');
%alpha= input('Inserisci un valore per il livello di significatività [1-100 %]: ');
%alpha=alpha/100;

disp('legge DSM');

DSM_fin= imread('2024_DSM_Areastabile.tif'); %%%%%%%%%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!
DSM_in=imread('2023_DSM_Areastabile.tif'); %%%%%%%%%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!

righe_1=size(DSM_in,1);
col_1=size(DSM_fin,2);

%%%%%%%%%          CALCOLA          DIFF          DSM
%%%%%%%%%

nodata=3.4e+38;

cont=1;

for i=1:righe_1
    for j=1:col_1
        if DSM_fin(i,j)>0 && DSM_in(i,j)>0          % Prende solo i valori in cui entrambi
i DSM non sono dei NoData

            Dati_1(cont,1)=DSM_fin(i,j);

            Dati_2(cont,1)= DSM_in(i,j);

            cont=cont+1;

```

```

    DSM_diff(i,j)=DSM_fin(i,j)-DSM_in(i,j);

else
    DSM_diff(i,j)=nodata;
end

end

end

%%%%%%%%%% GENERAZIONE CAMPIONI VARIAZIONE TRA DSM
%%%%%%%%%%

righe=size(DSM_diff,1);
col=size(DSM_diff,2);
vuota=zeros(righe,col);           % matrice degli outliers sopra soglia
contaer=0;                         % conta errori
contadat_ssoglia=0;               % conta dati senza soglia
contadat=0;                       % conta dati

errorvet(1,1)=1;
for i=1:1:righe
    for j=1:1:col
        if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata)           % selezione dei dati non no data

            if abs(DSM_diff(i,j))>soglia           % Dato per soglia

                vuota(i,j)=1;                       % immagine degli errori sopra soglia e
                contaer=contaer+1;
            end
        end
    end
end

```

```

        errorvet(contaer)=DSM_diff(i,j);           % vettore dei punti sopra soglia e no data

    else                                         % campione dati senza soglia

        contadat_ssoglia=contadat_ssoglia+1;

        dativet_ssoglia(contadat_ssoglia)=DSM_diff(i,j);   % campione dati senza soglia
    end

    contadat=contadat+1;                       % campione dati con soglia

    dativet(contadat)=DSM_diff(i,j);

end

end

end

dativet=sort(dativet);                         % campione dei dati con soglia
dativet_ssoglia=sort(dativet_ssoglia);         % campione dei dati senza soglia
errorvet=sort(errorvet);                       % campione degli errori
toc

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% STATISTICA
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

disp('statistica')                             % statistica media e sqm di tutti

for i=1:1:size(dativet_ssoglia,2);             % definizione numero colonne

    freq_ssoglia(i)=i/size(dativet_ssoglia,2); % frequenza senza soglia
end

for i=1:1:size(dativet,2);                     % definizione numero colonne

    freq(i)=i/size(dativet,2);                 % frequenza con soglia

```

```

end

percent=(contaer/size(dativet,2))*100;           % percentuale errori per figura finale

mediana=median(dativet_ssoglia);                % statistica su campione con soglie e
senza soglie

mediana_2=median(dativet);

media=mean(dativet_ssoglia);

media_2=mean(dativet);

sqm=std(dativet_ssoglia);

sqm_2=std(dativet);

v=dativet-media_2;

toc

disp('statistica senza code');                  % statistica media e sqm senza code

inizio=fix(size(dativet_ssoglia,2)*alpha/2);    % media senza le code con aplha
applicato al campione SENZA SOGLIA

fine=fix(size(dativet_ssoglia,2)*(1-alpha/2));

for i=inizio:1:fine

    senzacode(i-inizio+1)=dativet_ssoglia(i);

end

for i=1:1:size(senzacode,2);

    freq_senzacode(i)=i/size(senzacode,2);

end

med_senzacode=mean(senzacode);

```

```

sqm_senzacode=std(senzacode);
toc

v_senzacode=senzacode-med_senzacode;
m2=0;
m3=0;
m4=0;
for i=1:1:size(v_senzacode,2);                                %Skewness e curtosi senza code
    m2=m2+v_senzacode(i)^2;
    m3=m3+v_senzacode(i)^3;
    m4=m4+v_senzacode(i)^4;
end
m2=m2/size(v_senzacode,2);
m3=m3/size(v_senzacode,2);
m4=m4/size(v_senzacode,2);
gam=m3/m2^(3/2);                                             %indice Skewness - gamma di fisher
gam2=m4/m2^2-3;                                             %indice curtosi - gamma2 di fisher

disp('statistica robusta - minimi moduli');
for i=1:1:80;
    for i=1:1:size(v,2);                                       % media minimi moduli
        p(i)=abs(1/v(i));                                     % peso in base allo scarto
        m(i)=dativet(i)*p(i);
    end
    med_robu=sum(m)/sum(p);
    v=dativet-med_robu;

```

```

end
for i=1:1:size(dativet,2);                                % sqm minimi moduli
    sig(i)=p(i)*(v(i))^2;
end
sigma=(sum(sig)/sum(p)/(size(v,2)-1))^0.5;
toc

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% visualizza          video
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
disp('soglia');
disp(soglia);
disp('nodata');
disp(nodata);
disp('alpha');
disp(alpha);
disp('Soglie definite dal livello di significatività alpha');
disp(senzacode(1));
disp(senzacode(end));
disp('valori sopra soglia:');
disp(contaer);
disp('% valori sopra soglia:');
disp(percent);
disp('mediana senza soglia');
disp(mediana_2);
disp('media senza soglia');

```

```

disp(media_2);
disp('sqm senza soglia');
disp(sqm_2);
disp('mediana con soglia');
disp(media);
disp('media con soglia');
disp(media);
disp('sqm con soglia');
disp(sqm);
disp('media robusta')
disp(med_robu);
disp('sqm - media robusta')
disp(sigma);
disp('media senza code')
disp(med_senzacode);
disp('sqm popolazione senza code')
disp(sqm_senzacode);
disp('Skewnees - indice gamma Fisher');
disp(gam);
disp('Curtosi - indice gamma2 Fisher');
disp(gam2);

```

```

%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%

```

figure

```
figure(1);
```

```

set(1,'NumberTitle','off');
set(1,'Name','elevation differences');
hold all
imshow (DSM_diff);
title(['elevation differences [m]', 'FontSize',12)
ylabel('Nord','FontSize',12)
xlabel('Est','FontSize',12)
%legend(['red = local redundancy < ',num2str(cut_r)], ['green = local redundancy >
',num2str(cutmax_r)],'Location','Best');

figure(2);
set(2,'NumberTitle','off');
set(2,'Name','elevation differences above the threshold');
imshow (vuota);ylabel('Nord','FontSize',12)
title(['elevation differences above the threshold ',num2str(soglia),' m - ',num2str(percent), '%'],
'FontSize',12)
xlabel('Est','FontSize',12)
ylabel('Nord','FontSize',12)

figure(3);
set(3,'NumberTitle','off');
set(3,'Name','elevation differences');
hold all
grid on
plot(dativet,'LineWidth',2);
title(['elevation differences [m]', 'FontSize',12)
xlabel('number of DSM points','FontSize',12)

```

```

ylabel('DZ [m]','FontSize',12)

%legend(['average [m]= ',num2str(media)], ['standard deviation [m]= ',num2str(sqm)],'Location','Best');

stringa=strcat('ave=',num2str(media), ' std=',num2str(sqm));

x=size(dativet,2)/2;

y=max((dativet)+min(dativet))/2*3;

text(x,y,[stringa],'VerticalAlignment','bottom','HorizontalAlignment','right')

figure(4);

set(4,'NumberTitle','off');

set(4,'Name','elevation differences');

hold all

grid on

plot(dativet_ssoglia,'LineWidth',2);

title(['elevation differences (soglia) [m]'], 'FontSize',12)

xlabel('number of DSM points','FontSize',12)

ylabel('DZ [m]','FontSize',12)

%legend(['average [m]= ',num2str(media)], ['standard deviation [m]= ',num2str(sqm)],'Location','Best');

stringa=strcat('ave=',num2str(media), ' std=',num2str(sqm));

x=size(dativet_ssoglia,2)/2;

y=max((dativet_ssoglia)+min(dativet_ssoglia))/2*3;

text(x,y,[stringa],'VerticalAlignment','bottom','HorizontalAlignment','right')

figure(5);

set(5,'NumberTitle','off');

set(5,'Name','elevation differences above the threshold');

```

```
hold on
grid on
plot(errorvet,'LineWidth',2);
title(['elevation differences above the threshold ',num2str(soglia),' m - ',num2str(percent), '%'],
'FontSize',12)
xlabel('number of DSM points','FontSize',12)
ylabel('DZ [m]','FontSize',12)
```

```
figure(6);
set(6,'NumberTitle','off');
set(6,'Name','frequencies DZ');
hold on
grid on
plot(dativet,freq,'LineWidth',2);
title('frequencies DZ (All Data)' , 'FontSize',12)
ylabel('relative frequency ', 'FontSize',12)
xlabel('DZ [m]','FontSize',12)
```

```
figure(7);
set(7,'NumberTitle','off');
set(7,'Name','frequencies DZ');
hold on
grid on
plot(dativet_ssoglia,freq_ssoglia,'LineWidth',2);
title('frequencies DZ (with threshold)' , 'FontSize',12)
ylabel('relative frequency ', 'FontSize',12)
```

```

xlabel('DZ [m]',FontSize,12)

figure(8);
set(8,'NumberTitle','off');
set(8,'Name','elevation differences without queues');
hold on
grid on
plot(senzacode,'LineWidth',2)
title(['elevation differences [m] alpha= ',num2str(alpha)], 'FontSize',12)
xlabel('number of DSM points',FontSize,12)
ylabel('DZ [m]',FontSize,12)
stringa=strcat('ave=',num2str(med_senzacode), ' std=',num2str(sqm_senzacode));
x=size(senzacode,2)/2;
y=max((senzacode)+min(senzacode))/2*3;
text(x,y,[stringa], 'VerticalAlignment','bottom', 'HorizontalAlignment','right')

```

```

figure(9);
set(9,'NumberTitle','off');
set(9,'Name','frequencies DZ without queues ');
hold on
grid on
plot(senzacode,freq_senzacode,'LineWidth',2)
title('frequencies DZ without queues', 'FontSize',12)
ylabel('relative frequency %',FontSize,12)
xlabel('DZ [m]',FontSize,12)
toc

```



```

DSM_2=imread('2024_DSM_Areastabile.tif'); %%%%%%%%%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!
anno_2=2024; %%%%%%%%%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!
%%%%%%%%% INSERIRE alpha !!!!!!!!!!!!!!!

alpha=[0.05;0.1;0.15;0.25;0.5;0.75;1;1.25;1.5;2;2.5;3;3.5;4;4.5;5;6;7;8;9;10;11;12;13;15;20;30;4
0;45;50;75;90;100];

righe_1=size(DSM_1,1);
col_1=size(DSM_1,2);
righe_2=size(DSM_2,1);
col_2=size(DSM_2,2);

if righe_1 ~= righe_2 || col_1 ~= col_2
    disp('I due DSM hanno dimensioni differenti')
end

%% %%%%%%%%%% Calcolo indice di correlazione DSM
completo %%%%%%%%%%

%%%% Vettori dati DSM completi

cont=1;

for i=1:righe_1
    for j=1:col_1
        if DSM_1(i,j)>0 && DSM_2(i,j)>0 %% il dato viene salvato se in entrambi i DSM il valore
del pixel non è NoData

            Dati_1(cont,1)= DSM_1(i,j);
            Dati_2(cont,1)= DSM_2(i,j);

```

```

        cont=cont+1;

    end

end

end

end

%%% Statistica

Dati_1=sort(Dati_1);
sqm_1=std(Dati_1);
media_1=mean(Dati_1);

Dati_2=sort(Dati_2);
sqm_2=std(Dati_2);
media_2=mean(Dati_2);
N=size(Dati_2,1);

covarianza = sum((Dati_1-media_1).*(Dati_2-media_2))/N;
indice_correlazione = covarianza/(sqm_1*sqm_2);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

disp('Indicie di correlazione DSM completo')
disp(indice_correlazione)

```

Visualizzazione

Risultati

```

figure(1)
imshow(DSM_1)
title(['DSM ',num2str(anno_1)])

```

```

figure(2)
imshow(DSM_2)
title(['DSM ',num2str(anno_2)])

```

```

figure(3)
plot(Dati_1)
hold on
plot(Dati_2)
title('DN DSM')
legend(['Dati DSM ',num2str(anno_1)],['Dati DSM ',num2str(anno_2)])

```

```

clear indice_correlazione covarianza N media_2 Dati_2 sqm_2 Dati_1 sqm_1 media_1
%% %%% Calculo indice di correlazione degli
errori %%%

```

```

%% Diff DSM e faccio statistica per trovare OUTLIERS

```

```

nodata=3.4e+38;
cont=1;
for i=1:righe_1 %%% Genero DSM Diff
    for j=1:col_1
        if DSM_2(i,j)>0 && DSM_1(i,j)>0

```

```

        cont=cont+1;

        DSM_diff(i,j)=DSM_2(i,j)-DSM_1(i,j);

    else

        DSM_diff(i,j)=nodata;

    end

end

end

end

righe=size(DSM_diff,1);
col=size(DSM_diff,2);

cont_datiDiff=0;
for i=1:1:righe    %%% Genero vettore dati Diff DSM
    for j=1:1:col
        if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata);
            cont_datiDiff=cont_datiDiff+1;
            datiDiff(cont_datiDiff)=DSM_diff(i,j);
        end
    end
end

end

datiDiff=sort(datiDiff);

freq_diff=zeros(1,size(datiDiff,2));    %%% Visualizzo frequenze cumulate

```

```

for i=1:size(datiDiff,2)
freq_diff(i)=i/size(datiDiff,2);
end

figure(4)
plot(datiDiff,freq_diff)
title('ISTOGRAMMA CUMULATO dei DN appartenenti alla differenza tra DSM')
xlabel('Valori DN')
ylabel('Frequenza')
toc

cont_fig=5;
indice_correlazione_compl=zeros(size(alpha,1),1);
for ii=1:size(alpha,1)
s_max=prctile(datiDiff,(100-alpha(ii)/2));    %%%%%%%%% Definisco il livello di significatività
s_min=prctile(datiDiff,(alpha(ii)/2));

%%%%%%%% Vettori dati DSM correlati agli OUTLIERS

cont=1;

imm_vuota=zeros(righe_1,col_1);

num_err=0;
for i=1:righe_1
    for j=1:col_1

```

```
    if DSM_1(i,j)>0 && DSM_2(i,j)>0 && abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata) &&  
    DSM_diff(i,j)>s_max
```

```
        imm_vuota(i,j)=1;
```

```
        num_err=num_err+1;
```

```
        Dati_1(cont,1)= DSM_1(i,j);
```

```
        Dati_2(cont,1)= DSM_2(i,j);
```

```
        cont=cont+1;
```

```
    end
```

```
    if DSM_1(i,j)>0 && DSM_2(i,j)>0 && abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata) &&  
    DSM_diff(i,j)<s_min
```

```
        imm_vuota(i,j)=1;
```

```
        num_err=num_err+1;
```

```
        Dati_1(cont,1)= DSM_1(i,j);
```

```
        Dati_2(cont,1)= DSM_2(i,j);
```

```
        cont=cont+1;
```

```
    end
```

```
end
```

```
end
```

```
%%% Statistica
```

```

Dati_1=sort(Dati_1);
sqm_1=std(Dati_1);
media_1=mean(Dati_1);

Dati_2=sort(Dati_2);
sqm_2=std(Dati_2);
media_2=mean(Dati_2);
N=size(Dati_2,1);

covarianza = sum((Dati_1-media_1).*(Dati_2-media_2))/N;
indice_correlazione = covarianza/(sqm_1*sqm_2);

indice_correlazione_compl(ii)=indice_correlazione;

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

Visualizzazione

Risultati

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

disp('Indicie di correlazione OUTLIERS')

```

```

disp(indice_correlazione)

```

```

disp('alpha livello di significatività')

```

```

disp(alpha(ii))

```

```

figure(5)

```

```

plot(Dati_1)

```

```

hold on

```

```

plot(Dati_2)

```

```

title('OUTLIERS')

```

```

cont_fig=cont_fig+1;
figure(cont_fig)
imshow(imm_vuota)
title(['OUTLIERS          con          alpha:          ',num2str(alpha(ii)),'          ;
',num2str((num_err/size(datiDiff,2))*100),'%'])

end

cont_fig=cont_fig+1;
figure(cont_fig)
plot(alpha,indice_correlazione_compl)
title(['Indici di Correlazione in funzione del livello di significatività; ',num2str(anno_1),'-
',num2str(anno_2)])
xlabel('alpha')
ylabel('indici di correlazione DN DSM selezionati da OUTLIERS della differenza TRA DSM')
hold on
grid on

```

9.2.4. Script 2.3

```

%%%%%%%%%%%% Script per il calcolo dell'indice di correlazione tra DSM con la
%%%%%%%%%%%% possibilità di applicare un livello di significatività alpha
%%%%%%%%%%%% alla differenza tra i DSM e così studiare l'indicie di
%%%%%%%%%%%% correlazione degli OUTLIERS caratterizzanti i DSM.
%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%% 16/12/2024 @Tommaso Mainiero

```

clear all

close all

clc

%% Caricamento Dati
%%

% Importante che entrambi i DSM rappresentino la stessa area di studio.

% E`possibile selezionare delle aree specifiche con aree vettoriali (QGIS) e

% estrapolare il raster dell'area di interesse mediante estrazione con

% maschera. I no data dei DSM sono considerati negativi, non è importante

% che ci sia una perfetta sovrapposizione dei pixel tra DSM, che a volte con

% l'utilizzo di Qgis, non è possibile con i comandi di ritaglio.

tic

disp('Load Dati');

DSM_1= imread('2023_DSM_Areastabile.tif'); %%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!

anno_1=2023; %%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!

DSM_2=imread('2024_DSM_Areastabile.tif'); %%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!

anno_2=2024; %%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!

alpha=5; %%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!

righe_1=size(DSM_1,1);

col_1=size(DSM_1,2);

righe_2=size(DSM_2,1);

col_2=size(DSM_2,2);

```
if righe_1 ~= righe_2 || col_1 ~= col_2
```

```
    disp('I due DSM hanno dimensioni differenti')
```

```
end
```

```
%% %%% Calculo indice di correlazione DSM  
completo %%%
```

```
%% Vettori dati DSM
```

```
cont=1;
```

```
for i=1:righe_1
```

```
    for j=1:col_1
```

```
        if DSM_1(i,j)>0 && DSM_2(i,j)>0
```

```
            Dati_1(cont,1)= DSM_1(i,j);
```

```
            Dati_2(cont,1)= DSM_2(i,j);
```

```
            cont=cont+1;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
%%% Statistica
```

```
Dati_1=sort(Dati_1);
```

```
sqm_1=std(Dati_1);
```

```
media_1=mean(Dati_1);
```

```
Dati_2=sort(Dati_2);
```

```
sqm_2=std(Dati_2);
```

```
media_2=mean(Dati_2);
```

```
N=size(Dati_2,1);
```

```
covarianza = sum((Dati_1-media_1).*(Dati_2-media_2))/N;
```

```
indice_correlazione = covarianza/(sqm_1*sqm_2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Visualizzazione

Risultati

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
disp('Indicie di correlazione DSM completo')
```

```
disp(indice_correlazione)
```

```
figure(1)
```

```
imshow(DSM_1)
```

```
title(['DSM ',num2str(anno_1)])
```

```
figure(2)
```

```
imshow(DSM_2)
```

```
title(['DSM ',num2str(anno_2)])
```

```
figure(3)
```

```

plot(Dati_1)
hold on
plot(Dati_2)
title('DN DSM')
legend(['Dati DSM ',num2str(anno_1)],['Dati DSM ',num2str(anno_2)])

clear indice_correlazione covarianza N media_2 Dati_2 sqm_2 Dati_1 sqm_1 media_1
%% %%% Calculo indice di correlazione dei
DSM trovati con errori %%%
%% %%%

% Differenza DSM e statistica per l'identificazione degli OUTLIERS

nodata=3.4e+38;
cont=1;
for i=1:righe_1 %%% DSM differenza
    for j=1:col_1
        if DSM_2(i,j)>0 && DSM_1(i,j)>0
            cont=cont+1;
            DSM_diff(i,j)=DSM_2(i,j)-DSM_1(i,j);
        else
            DSM_diff(i,j)=nodata;
        end
    end
end
end
end

```

```

righe=size(DSM_diff,1);
col=size(DSM_diff,2);

cont_datiDiff=0;
for i=1:1:righe    %%% Genero vettore dati Diff DSM
    for j=1:1:col
        if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata);
            cont_datiDiff=cont_datiDiff+1;
            datiDiff(cont_datiDiff)=DSM_diff(i,j);
        end
    end
end

datiDiff=sort(datiDiff);
freq_diff=zeros(1,size(datiDiff,2));    %%% Visualizzo frequenze cumulate

for i=1:size(datiDiff,2)
    freq_diff(i)=i/size(datiDiff,2);
end

figure(4)
plot(datiDiff,freq_diff)
title('ISTOGRAMMA CUMULATO dei DN appartenenti alla differenza tra DSM')
xlabel('Valori DN')
ylabel('Frequenza')

```

toc

```
s_max=prctile(datiDiff,(100-alpha/2));  %%%%%%%%% Definisco il livello di significatività
s_min=prctile(datiDiff,(alpha));
```

```
%%%%%%%% Vettori dati DSM correlati agli OUTLIERS
```

```
cont=1;
```

```
imm_vuota=zeros(righe_1,col_1);
```

```
num_err=0;
```

```
for i=1:righe_1
```

```
    for j=1:col_1
```

```
        if DSM_1(i,j)>0  &&  DSM_2(i,j)>0  &&  abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata)  &&
        DSM_diff(i,j)>s_max
```

```
            imm_vuota(i,j)=1;
```

```
            num_err=num_err+1;
```

```
            Dati_1(cont,1)= DSM_1(i,j);
```

```
            Dati_2(cont,1)= DSM_2(i,j);
```

```
            cont=cont+1;
```

```
        end
```

```
if DSM_1(i,j)>0 && DSM_2(i,j)>0 && abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata) &&  
DSM_diff(i,j)<s_min
```

```
imm_vuota(i,j)=1;
```

```
num_err=num_err+1;
```

```
Dati_1(cont,1)= DSM_1(i,j);
```

```
Dati_2(cont,1)= DSM_2(i,j);
```

```
cont=cont+1;
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
%%% Statistica
```

```
Dati_1=sort(Dati_1);
```

```
sqm_1=std(Dati_1);
```

```
media_1=mean(Dati_1);
```

```
Dati_2=sort(Dati_2);
```

```
sqm_2=std(Dati_2);
```

```
media_2=mean(Dati_2);
```

```
N=size(Dati_2,1);
```

```
covarianza = sum((Dati_1-media_1).*(Dati_2-media_2))/N;
```

```
indice_correlazione = covarianza/(sqm_1*sqm_2);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
disp('Indicie di correlazione OUTLIERS')
```

```
disp(indice_correlazione)
```

```
disp('alpha livello di significatività')
```

```
disp(alpha)
```

```
figure(5)
```

```
imshow(imm_vuota)
```

```
title(['OUTLIERS con alpha: ',num2str(alpha),' ; ',num2str(num_err/size(datiDiff,2)),'%'])
```

```
figure(6)
```

```
imshow(DSM_diff,[])
```

```
title('Differenza tra DSM')
```

```
figure(7)
```

```
plot(Dati_1)
```

```
hold on
```

```
plot(Dati_2)
```

```
title('DN degli OUTLEIERS dei DSM definiti grazie alla differenza tra DSM')
```

```
legend(['Dati DSM ',num2str(anno_1)],['Dati DSM ',num2str(anno_2)])
```

9.3. Script 3: Algoritmo per il calcolo del Lod mediante stima ai minimi quadrati

Script che dati 5 DSM di aree stabili (quinquennio) esegue
analisi statistica della differenza di DI TUTTE LE COPPIE DEI DSM.
Successivamente calcola la std dei DSM con il principio di propagazione
della
varianza e con l'ipotesi che coincidano tra coppie.
Nel caso si abbiano meno dati si possono caricare lo stesso DSM
più volte. La statistica senza code utilizza diversi livelli
di significatività sulle coppie di differenze tra DSM.
Successivamente si procede con la stima delle std tra DSM con
l'utilizzo del metodo dei Minimi quadrati permettendo di
apprezzarne le differenze.

@Tommaso Mainiero 11/2024

clc

clear all

close all

format short

Dati

5

nodata=3.4e+38;

alpha=[5;5;5;5;5]; INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!! Alpha specifico per ogni DSM, li
comprendo da un analisi più seicifica dei risultati

tic

carica DSM

```

disp('Caricamento DSM');

DSM_2020 = imread('2020_DSM_Areastabile_lontanaGCP.tif'); %%%%%%%%%% INSERIRE
!!!!!!!!!!!!!!

matrices{1}=DSM_2020;

DSM_2021 = imread('2021_DSM_Areastabile_lontanaGCP.tif'); %%%%%%%%%% INSERIRE
!!!!!!!!!!!!!!

matrices{2}=DSM_2021;

DSM_2022 = imread('2022_DSM_Areastabile_lontanaGCP.tif'); %%%%%%%%%% INSERIRE
!!!!!!!!!!!!!!

matrices{3}=DSM_2022;

DSM_2023 = imread('2023_DSM_Areastabile_lontanaGCP.tif'); %%%%%%%%%% INSERIRE
!!!!!!!!!!!!!!

matrices{4}=DSM_2023;

DSM_2024 = imread('2024_DSM_Areastabile_lontanaGCP.tif'); %%%%%%%%%% INSERIRE
!!!!!!!!!!!!!!

matrices{5}=DSM_2024;

toc

%%      %%%%%%%%%%          GENERAZIONE      DIFF      DSM
%%%%%%%%%5

righe_1=size(DSM_2021,1);

col_1=size(DSM_2021,2);

for z=1:5

for k=1:5

disp('Diff')

```

```
DSM_fin= matrices{z};
```

```
DSM_in=matrices{k};
```

```
for i=1:1:righe_1
```

```
    for j=1:1:col_1
```

```
        if DSM_fin(i,j)>0 && DSM_in(i,j)>0
```

```
            DSM_diff(i,j)=DSM_fin(i,j)-DSM_in(i,j);
```

```
        else
```

```
            DSM_diff(i,j)=nodata;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
%%          %%%%%%%%%%%
```

```
GENERAZIONE
```

```
CAMPIONI
```

```
%%%%%%%%%%
```

```
cont=1;
```

```
for i=1:righe_1
```

```
% DSM differenza
```

```
    for j=1:col_1
```

```
        if DSM_fin(i,j)>0 && DSM_in(i,j)>0
```

```
            cont=cont+1;
```

```
            DSM_diff(i,j)=DSM_fin(i,j)-DSM_in(i,j);
```

```
        else
```

```
            DSM_diff(i,j)=nodata;
```

```

        end
    end
end

righe=size(DSM_diff,1);
col=size(DSM_diff,2);

cont_datiDiff=0;
for i=1:1:righe                                % vettore dati Diff DSM
    for j=1:1:col
        if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata)
            cont_datiDiff=cont_datiDiff+1;
            datiDiff(cont_datiDiff)=DSM_diff(i,j);
        end
    end
end

datiDiff=sort(datiDiff);
freq_diff=zeros(1,size(datiDiff,2));          % Visualizzo frequenze cumulate

for i=1:size(datiDiff,2)
    freq_diff(i)=i/size(datiDiff,2);
end

```

```

%%      %%%%%%%%%%% STATISTICA PER I CAMPIONI
%%%%%%%%%%

% Statistica con code

disp('Statistica DIFFERENZA DSM')           % statistica media e sqm di tutti

mediana=median(datiDiff);                   % statistica su campione con soglie e senza
soglie

media=mean(datiDiff);

sqm=std(datiDiff);

% statistica media e sqm senza code

disp('statistica senza code');             % statistica media e sqm senza code

alphadx=alpha(k)/2;   %%%%%%%%%%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!
alphasx=alpha(k)/2;   %%%%%%%%%%% INSERIRE !!!!!!!!!!!!!!!

s_max=prctile(datiDiff,(100-alphadx));      % Soglie con possibile aplha non
simmetrico

s_min=prctile(datiDiff,(alphasx));

senzacode=datiDiff(datiDiff<=s_max & datiDiff>=s_min);    % Campione senza le code

% Media senza le code con aplha applicato al campione

for i=1:1:size(senzacode,2);

```

```

    freq_senzacode(i)=i/size(senzacode,2);
end

med_senzacode=mean(senzacode);
sqm_senzacode=std(senzacode);

v_senzacode=senzacode-med_senzacode;
m2=0;
m3=0;
m4=0;
for i=1:1:size(v_senzacode,2);           % Skewness e curtosi senza code
    m2=m2+v_senzacode(i)^2;
    m3=m3+v_senzacode(i)^3;
    m4=m4+v_senzacode(i)^4;
end
m2=m2/size(v_senzacode,2);
m3=m3/size(v_senzacode,2);
m4=m4/size(v_senzacode,2);
gam=m3/m2^(3/2);                         % Indice Skewness - gamma di fisher
gam2=m4/m2^2-3;                          % Indice curtosi - gamma2 di fisher

toc

```

%%%%%%%%%% RISOLUZIONE PER DEFINIRE SQM DSM con l'ipotesi di uguale
varianza tra DSM %%%%%%%%%%

```
sqm_senzacode_finale(z,k)=sqm_senzacode;  
sqm_DS莫originale=sqrt((sqm_senzacode_finale.^2)/2);  
med_senzacode_finale(z,k)=med_senzacode;  
Skewnees_indice_gamma_Fisher(z,k)=gam;  
Curtosi_indice_Fisher(z,k)=gam2;
```

end

end

toc

%%%%%%%%%% DISP RISULTATI %%%%%%%%%%

```
disp('alpha');
```

```
disp(alpha);
```

```
disp('media senza code')
```

```
disp(med_senzacode_finale);
```

```
disp('sqm popolazione senza code')
```

```
disp(sqm_senzacode_finale);
```

```
disp('sqm DSM per ipotesi con la stessa precisione')
```

```
disp(sqm_DS莫originale);
```

```
disp('Skewnees - indice gamma Fisher');
```

```
disp(Skewnees_indice_gamma_Fisher);
```

```
disp('Curtosi - indice gamma2 Fisher');
```

```
disp(Curtosi_indice_Fisher);
```

```
%%%%%%%%%%%%%% RISOLUZIONE CON MINIMI QUADRATI PER DEFINIRE SQM DSM
%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%% introduzione delle misure
```

```
sqm_10=[sqm_senzacode_finale(1,2);sqm_senzacode_finale(1,3);sqm_senzacode_finale(2,3);sq
m_senzacode_finale(1,4);sqm_senzacode_finale(2,4);sqm_senzacode_finale(3,4);sqm_senzacod
e_finale(1,5);sqm_senzacode_finale(2,5);sqm_senzacode_finale(3,5);sqm_senzacode_finale(4,5)
];
```

```
var_10=sqm_10.^2;
```

```
media_10=[med_senzacode_finale(1,2);med_senzacode_finale(1,3);med_senzacode_finale(2,3);
med_senzacode_finale(1,4);med_senzacode_finale(2,4);med_senzacode_finale(3,4);med_senzac
ode_finale(1,5);med_senzacode_finale(2,5);med_senzacode_finale(3,5);med_senzacode_finale(4
,5)];
```

```
%% struttura della matrice disegno
```

```
A_media=[-1 1 0 0 0;
```

```
-1 0 1 0 0;
```

```
0 -1 1 0 0;
```

```
-1 0 0 1 0;
```

```
0 -1 0 1 0;
```

```
0 0 -1 1 0;
```

```
-1 0 0 0 1;
```

```
0 -1 0 0 1;
```

```
0 0 -1 0 1;
```

```
0 0 0 -1 1];
```

```

A_sqm=[1 1 0 0 0;
        1 0 1 0 0;
        0 1 1 0 0;
        1 0 0 1 0;
        0 1 0 1 0;
        0 0 1 1 0;
        1 0 0 0 1;
        0 1 0 0 1;
        0 0 1 0 1;
        0 0 0 1 1];

```

```

% calcolo delle incognite stimate con minimi quadrati, matrice pesi è

```

```

% identità

```

```

vett_incoglito_media_DSM=pinv(A_media'*A_media)*A_media'*media_l0; % pinv

```

```

vett_incoglito_var_DSM=inv(A_sqm'*A_sqm)*A_sqm'*var_l0;

```

```

vett_incoglito_sqm_DSM=sqrt(abs(vett_incoglito_var_DSM));

```

```

%%%%%%%%%% DISP RISULTATI %%%%%%%%%%%

```

```

disp('MEDIA DSM con minimi quadrati');

```

```

disp(vett_incoglito_media_DSM);

```

```

disp('SQM DSM con minimi quadrati');

```

```

disp(vett_incoglito_sqm_DSM);

```

9.4. Script 4: Analisi statistica del DoD

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Programma per l'analisi statistica dei DoD, dell'analisi
statistica in
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% funzione della quota e calcolo della variazione
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% volumetrica
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% @Tommaso Mainiero

close all

clc

disp('Caricamento DSM');

tic

%%          %%%%%%%%%%%%%%%          dati          di          input
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

soglia=10; %[m]  %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE %%%%%%%%%%%%%%%
quota_soglia=2800; %[m]  %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE %%%%%%%%%%%%%%%
alpha=1; %[%]  %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE %%%%%%%%%%%%%%%
GSD=0.5; %[m]  %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE %%%%%%%%%%%%%%%
DSM_fin=  imread('DSM_2024.tif');          %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
anno_fin=2024;          %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE %%%%%%%%%%%%%%%
DSM_in=imread('DSM_2023.tif');          %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
anno_in=2023;          %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE %%%%%%%%%%%%%%%
righe_1=size(DSM_in,1);
col_1=size(DSM_fin,2);
```

```

toc
tic
nodata=3.4e+38;      %%%%%%%%%3.4*10^38;  %arrotonda per difetto  NODATA_value  -
3.4028234663852885981e+38

disp('Calcolo DoD');

%%%%%%%%%%          CALCOLA    DIFF    DSM
%%%%%%%%%%

for i=1:1:righe_1
    for j=1:1:col_1
        if DSM_fin(i,j)>0 && DSM_in(i,j)>0
            DSM_diff(i,j)=DSM_fin(i,j)-DSM_in(i,j);
        else
            DSM_diff(i,j)=nodata;
        end
    end
end

end

figure(1)
set(1,'NumberTitle','off');
set(1,'Name','DoD');
hold all
imshow (DSM_diff);
title('DoD [m]', 'FontSize',12)
ylabel('Nord','FontSize',12)
xlabel('Est','FontSize',12)
toc

```

```
%%
```

```
%%%%%%%%%
```

GENERAZIONE

CAMPIONI

```
%%%%%%%%%
```

```
righe=size(DSM_diff,1);
```

```
col=size(DSM_diff,2);
```

```
contadat=0; % conta dati
```

```
contadat_2=0;
```

```
for i=1:1:righe
```

```
    for j=1:1:col
```

```
        if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata) && DSM_diff(i,j)<soglia ; %trova errore per no data  
%%DOAMNDA??? non dovrebbe essere maggiore ?
```

```
            contadat=contadat+1;
```

```
            dativet_1(contadat)=DSM_fin(i,j);
```

```
            dativet_2(contadat)=DSM_diff(i,j); % creo matrice con prima colonna i valori di quota e  
per seconda diff per ogni pixel
```

```
        end
```

```
    if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata)
```

```
        contadat_2=contadat_2+1;
```

```
        dati_freq(contadat_2)= DSM_diff(i,j);
```

```
    end
```

```
end
```

```
end
```

```
datiDiff=dativet_2;
```

```

%%%%%%%%%% STATISTICA DIFFERENZA DSM
%%%%%%%%%%

```

```

% Statistica con code

```

```

disp('Statistica DIFFERENZA DSM') % statistica media e sqm di tutti

```

```

datiDiff=sort(datiDiff);

```

```

dati_freq=sort(dati_freq);

```

```

freq_diff=zeros(1,size(datiDiff,2)); % Visualizzo frequenze cumulate

```

```

freq=zeros(1,size(dati_freq,2));

```

```

for i=1:size(datiDiff,2)

```

```

    freq_diff(i)=i/size(datiDiff,2);

```

```

end

```

```

for i=1:size(dati_freq,2)

```

```

    freq(i)=i/size(dati_freq,2);

```

```

end

```

```

mediana=median(datiDiff); % statistica su campione con soglie e senza
soglie

```

```

media=mean(datiDiff);

```

```

sqm=std(datiDiff);

```

```

disp('Statistica senza code');

```

```
% statistica media e sqm senza code
```

```
alphadx= alpha/2;
```

```
alphasx= alpha/2;
```

```
alpha_def = alphasx + alphadx;
```

```
s_max=prctile(datiDiff,(100-alphadx));  
simmetrico
```

```
% Soglie con possibile aplha non
```

```
s_min=prctile(datiDiff,(alphasx));
```

```
figure(2)
```

```
set(2,'NumberTitle','off');
```

```
set(2,'Name','CDF DoD');
```

```
plot(dati_freq,freq,'LineWidth',1.5)
```

```
hold all
```

```
grid on
```

```
title('ISTOGRAMMA CUMULATO dei DN appartenenti al DoD','FontSize',19)
```

```
xlabel('Valori DN DOD','FontSize',19)
```

```
ylabel('Frequenza','FontSize',19)
```

```
imm_vuota_fin=zeros(righe_1,col_1);
```

```
num_err=0;
```

```
for i=1:righe_1
```

```
% Immagine con OUTLIERS DSM_diff con
```

```
alphadx e alphasx
```

```
    for j=1:col_1
```

```

if DSM_diff(i,j)>s_max || (DSM_diff(i,j)<s_min && DSM_fin(i,j)>quota_soglia)

    imm_vuota_fin(i,j)=1;
if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata)
    num_err= num_err+1;
end
end
end
end

end

senzacode=[];
for iii=1 : size(dativet_2,2)

    if dativet_2 (iii) <= s_max && (dativet_2 (iii) > s_min || dativet_1 (iii) < quota_soglia)
        senzacode(end+1)=dativet_2(iii);        % Campione senza le code
    end
end

end

figure(4)
imshow(imm_vuota_fin)

```

```
title(['OUTLIERS DoD con alpha: ',num2str(alpha),'%; ', 'soglia: ',num2str(soglia),'[m];',num2str(100-(size(senzacode,2)/size(dativet_2,2))*100),'%'])
```

```
% Media senza le code con aplha applicato al campione
```

```
volume = 0;
```

```
Area_ghiacciaio= GSD^2 * size(senzacode,2);
```

```
for i=1:1:size(senzacode,2);
```

```
    volume = volume + senzacode(i)*(GSD^2);
```

```
end
```

```
senzacode=sort(senzacode);
```

```
for i=1:size(senzacode,2)
```

```
    freq_senzacode(i)=i/size(senzacode,2);
```

```
end
```

```
a=find(senzacode == s_min);
```

```
figure(3)
```

```
set(2,'NumberTitle','off');
```

```
set(2,'Name','CDF DoD con soglie');
```

```
plot(datiDiff,freq_diff,'LineWidth',1.5)
```

```
hold all
```

```

plot(senzacode(1:(a)),freq_senzacode(1:(a)), 'ro', 'MarkerSize', 6, 'LineWidth', 1.5)
plot(senzacode((a):end),freq_senzacode((a):end),'r.', 'MarkerSize', 6, 'LineWidth', 1.5)
grid on
title('ISTOGRAMMA CUMULATO dei DN appartenenti al DoD','FontSize',19)
xline(s_max, 'r--', sprintf('soglia %.2f%%', alpha_def), 'FontSize', 14);
xline(s_max, 'r--','FontSize', 14);
xlabel('Valori DN DOD','FontSize',19)
ylabel('Frequenza','FontSize',19)

x_fill_1 = [ datiDiff(1) datiDiff(1) s_min s_min]; % Coordinata X dell'area
y_fill = [0 1 1 0]; % Coordinata Y dell'area
fill(x_fill_1, y_fill, 'r', 'FaceAlpha', 0.1); % Aggiunge area rossa trasparente
x_fill_2 = [ s_max s_max datiDiff(end) datiDiff(end)]; % Coordinata X3 dell'area
y_fill = [0 1 1 0]; % Coordinata Y dell'area
fill(x_fill_2, y_fill, 'r', 'FaceAlpha', 0.1); % Aggiunge area rossa trasparente

med_senzacode=mean(senzacode);
sqm_senzacode=std(senzacode);

v_senzacode=senzacode-med_senzacode;
m2=0;
m3=0;
m4=0;
for i=1:1:size(v_senzacode,2); % Skewness e curtosi senza code
    m2=m2+v_senzacode(i)^2;

```

```

    m3=m3+v_senzacode(i)^3;
    m4=m4+v_senzacode(i)^4;
end
m2=m2/size(v_senzacode,2);
m3=m3/size(v_senzacode,2);
m4=m4/size(v_senzacode,2);
gam=m3/m2^(3/2); % Indice Skewness - gamma di fisher
gam2=m4/m2^2-3; % Indice curtosi - gamma2 di fisher

dativet(:,1)=dativet_1;
dativet(:,2)=dativet_2;
matrice= dativet;
toc

disp('RISULTATI')
disp('.')
disp('alpha applicato sulla coda dx');
disp(alphadx);
disp('alpha applicato sulla coda sx');
disp(alphasx);
disp('Soglie definite dal livello di significatività alpha');
disp(s_max);
disp(s_min);
disp('Intervallo di valori compresi i dati sul fronte non soggetti a soglia');
disp(senzacode(1));
disp(senzacode(end));

```

```

disp('valori sopra soglia:');
disp(size(datiDiff,2)-size(senzacode,2));
disp('% valori sopra soglia:');
disp((((size(datiDiff,2)-size(senzacode,2))*100/size(datiDiff,2)));
disp('mediana');
disp(mediana);
disp('media');
disp(media);
disp('sqm');
disp(sqm);
disp('media senza code')
disp(med_senzacode);
disp('sqm popolazione senza code')
disp(sqm_senzacode);
disp('Skewnees - indice gamma Fisher');
disp(gam);
disp('Curtosi - indice gamma2 Fisher');
disp(gam2);
disp('Variazione di volume');
disp(volume);
disp('Area');
disp(Area_ghiacciaio);

%% Plot Variazione altezza del ghiacciaio in funzione della quota
tic
disp('Calcolo statistica differenze DN in funzione delle quote');

```

```

% Calcola i percentili 2.5% e 97.5% della seconda colonna
p_2_5 = prctile(matrice(:, 2), alpha/2);
p_97_5 = prctile(matrice(:, 2), 100 - alpha/2);

% Filtra i valori che sono dentro il range tra il 2.5% e il 97.5%
righe_filtrate = find(matrice(:, 2) >= p_2_5 & matrice(:, 2) <= p_97_5);

% Seleziona le righe della matrice che sono dentro l'intervallo desiderato
matrice = matrice(righe_filtrate, :);

matrice(:, 1) = floor(matrice(:, 1)); %% tronca parte decimale alle quote

% Se ci sono più valori di quota ne prende solo 1
valori_unici = unique(matrice(:, 1));

% Prealloca la matrice di risultato
matrice_risultato = zeros(length(valori_unici), 6);

% Per ogni valore unico nella prima colonna
for i = 1:length(valori_unici)
    % Trova le righe che corrispondono a quel valore nella prima colonna

    righe_quota = find(matrice(:, 1) == valori_unici(i));

```

```

% Estrai i valori corrispondenti dalla seconda colonna
valori_seconda_colonna = matrice(righe_quota, 2);

% Calcola la media e la deviazione standard
media = mean(valori_seconda_colonna);
std_dev = std(valori_seconda_colonna);

volume_singolaquota = 0; %% per il calcolo preciso dal campione statistico
for ii= size (valori_seconda_colonna,1)
    volume_singolaquota = volume_singolaquota + valori_seconda_colonna(ii)*GSD^2;
end

volume_da_media=media*size (valori_seconda_colonna,1)*GSD^2;

% Memorizza il risultato nella matrice di risultato

matrice_risultato(i, 1) = valori_unici(i); % quote
matrice_risultato(i, 2) = media;
matrice_risultato(i, 3) = std_dev;
matrice_risultato(i, 4) = volume_singolaquota;
matrice_risultato(i,5) = size (valori_seconda_colonna,1) *GSD^2;
matrice_risultato(i,6) = volume_da_media;

% volumi al variare della quota
end

```

```
sigma_up(:,1)=matrice_risultato(:, 2)+matrice_risultato(:, 3);
sigma_up(:,2)=matrice_risultato(:, 2)+2*matrice_risultato(:, 3);
sigma_up(:,3)=matrice_risultato(:, 2)+3*matrice_risultato(:, 3);
sigma_down(:,1)=matrice_risultato(:, 2)-matrice_risultato(:, 3);
sigma_down(:,2)=matrice_risultato(:, 2)-2*matrice_risultato(:, 3);
sigma_down(:,3)=matrice_risultato(:, 2)-3*matrice_risultato(:, 3);
```

```
toc
```

```
%%
```

```
figure (5)
```

```
yyaxis left
```

```
plot(matrice_risultato(:, 1),matrice_risultato(:, 2),'-b','LineWidth', 3)
```

```
hold on
```

```
plot(matrice_risultato(:, 1),sigma_up(:,1),'-k', 'LineWidth', 1)
```

```
hold on
```

```
plot(matrice_risultato(:, 1),sigma_up(:,2),'-k', 'LineWidth', 2)
```

```
hold on
```

```
plot(matrice_risultato(:, 1),sigma_up(:,3),'-k', 'LineWidth', 3)
```

```
hold on
```

```
plot(matrice_risultato(:, 1),sigma_down(:,1),'-k', 'LineWidth', 1 )
```

```
hold on
```

```
plot(matrice_risultato(:, 1),sigma_down(:,2),'-k', 'LineWidth', 2)
```

```

hold on
plot(matrice_risultato(:, 1),sigma_down(:,3),'-k', 'LineWidth', 3)
hold on

title(['Variazione altezza del ghiacciaio in funzione della quota ', num2str(anno_in),'-
',num2str(anno_fin)])
xlabel('Quota s.l.m.[m]')
ylabel('Variazione di altezza del ghiacciaio [m/anno]')
legend('Media','sigma (68.26%)','2sigma (95.44%)','3sigma (99.73%)','Location','southeast')
grid on

yyaxis right
plot(matrice_risultato(:, 1),matrice_risultato(:, 5),'r','LineWidth', 3)
ylabel('Area [m2]')

figure (6)
yyaxis left
%plot(matrice_risultato(:, 1),matrice_risultato(:, 4),'ob','LineWidth', 2)
plot(matrice_risultato(:, 1),matrice_risultato(:, 6),'-b','LineWidth', 2)

title(['Variazione volume del ghiacciaio in funzione della quota ', num2str(anno_in),'-
',num2str(anno_fin)])
xlabel('Quota s.l.m.[m]')
ylabel('Variazione di volume del ghiacciaio [m3/anno]')
legend('Volume reale','Volume medio della quota','Area')
grid on

```

```

yyaxis right
plot(matrice_risultato(:, 1),matrice_risultato(:, 5),'r','LineWidth', 3)
ylabel('Area [m2]')

%% crea variabili per plot quinquennio media e std

quota20242023=matrice_risultato(:, 1);
media20242023=matrice_risultato(:, 2);
volume20242023=matrice_risultato(:,6);
area_plotfinale=matrice_risultato(:,5);

clearvars -except area_plotfinale volume20212020 volume20222021 volume20232022
volume20242023 quota20242023 media20242023 quota20232022 media20232022
quota20222021 media20222021 quota20212020 media20212020;

```

9.5. Script 5: Plot dell'analisi del DoD nel quinquennio 2020-2024

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Programma per l'analisi statistica dei DoD, dell'analisi statistica in
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% funzione della quota e calcolo della variazione
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% volumetrica
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% @Tommaso Mainiero
```

```
close all
```

```
clc
```

```
disp('Caricamento DSM');
```

```
tic
```

```
%%          %%%%%%%%%%%%%%%          dati          di          input  
%%%%%%%%%%%%%%
```

```
soglia=10; %[m] %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE %%%%%%%%%%%%%%%
```

```
quota_soglia=2800; %[m] %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE %%%%%%%%%%%%%%%
```

```
alpha=1; %[%] %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE %%%%%%%%%%%%%%%
```

```
GSD=0.5; %[m] %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE %%%%%%%%%%%%%%%
```

```
DSM_fin= imread('DSM_2024.tif'); %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE  
%%%%%%%%%%%%%%
```

```
anno_fin=2024; %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE %%%%%%%%%%%%%%%
```

```
DSM_in=imread('DSM_2023.tif'); %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE  
%%%%%%%%%%%%%%
```

```
anno_in=2023; %%%%%%%%%%%%%%% INSERIRE %%%%%%%%%%%%%%%
```

```
righe_1=size(DSM_in,1);
```

```
col_1=size(DSM_fin,2);
```

```

toc
tic
nodata=3.4e+38;      %%%%%%%%%3.4*10^38;  %arrotonda per difetto  NODATA_value  -
3.4028234663852885981e+38
disp('Calcolo DoD');
%%%%%%%%%%CALCOLA  DIFF  DSM
%%%%%%%%%%
for i=1:1:righe_1
    for j=1:1:col_1
        if DSM_fin(i,j)>0 && DSM_in(i,j)>0
            DSM_diff(i,j)=DSM_fin(i,j)-DSM_in(i,j);
        else
            DSM_diff(i,j)=nodata;
        end
    end
end
end

figure(1)
set(1,'NumberTitle','off');
set(1,'Name','DoD');
hold all
imshow (DSM_diff);
title('DoD [m]', 'FontSize',12)
ylabel('Nord','FontSize',12)
xlabel('Est','FontSize',12)
toc

```

```
%%
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

GENERAZIONE

CAMPIONI

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
righe=size(DSM_diff,1);
```

```
col=size(DSM_diff,2);
```

```
contadat=0; % conta dati
```

```
contadat_2=0;
```

```
for i=1:1:righe
```

```
    for j=1:1:col
```

```
        if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata) && DSM_diff(i,j)<soglia ; %trova errore per no data  
        %%DOAMNDA??? non dovrebbe essere maggiore ?
```

```
            contadat=contadat+1;
```

```
            dativet_1(contadat)=DSM_fin(i,j);
```

```
            dativet_2(contadat)=DSM_diff(i,j); % creo matrice con prima colonna i valori di quota e  
per seconda diff per ogni pixel
```

```
        end
```

```
    if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata)
```

```
        contadat_2=contadat_2+1;
```

```
        dati_freq(contadat_2)= DSM_diff(i,j);
```

```
    end
```

```
end
```

```
end
```

```
datiDiff=dativet_2;
```

```

%%%%%%%%%% STATISTICA DIFFERENZA DSM
%%%%%%%%%%

```

```

% Statistica con code

```

```

disp('Statistica DIFFERENZA DSM') % statistica media e sqm di tutti

```

```

datiDiff=sort(datiDiff);

```

```

dati_freq=sort(dati_freq);

```

```

freq_diff=zeros(1,size(datiDiff,2)); % Visualizzo frequenze cumulate

```

```

freq=zeros(1,size(dati_freq,2));

```

```

for i=1:size(datiDiff,2)

```

```

    freq_diff(i)=i/size(datiDiff,2);

```

```

end

```

```

for i=1:size(dati_freq,2)

```

```

    freq(i)=i/size(dati_freq,2);

```

```

end

```

```

mediana=median(datiDiff); % statistica su campione con soglie e senza
soglie

```

```

media=mean(datiDiff);

```

```

sqm=std(datiDiff);

```

```

disp('Statistica senza code');

```

```
% statistica media e sqm senza code
```

```
alphadx= alpha/2;
```

```
alphasx= alpha/2;
```

```
alpha_def = alphasx + alphadx;
```

```
s_max=prctile(datiDiff,(100-alphadx));
```

```
% Soglie con possibile aplha non
```

```
simmetrico
```

```
s_min=prctile(datiDiff,(alphasx));
```

```
figure(2)
```

```
set(2,'NumberTitle','off');
```

```
set(2,'Name','CDF DoD');
```

```
plot(dati_freq,freq,'LineWidth',1.5)
```

```
hold all
```

```
grid on
```

```
title('ISTOGRAMMA CUMULATO dei DN appartenenti al DoD','FontSize',19)
```

```
xlabel('Valori DN DOD','FontSize',19)
```

```
ylabel('Frequenza','FontSize',19)
```

```
imm_vuota_fin=zeros(righe_1,col_1);
```

```
num_err=0;
```

```
for i=1:righe_1
```

```
% Immagine con OUTLIERS DSM_diff con
```

```
alphadx e alphasx
```

```
    for j=1:col_1
```

```

if DSM_diff(i,j)>s_max || (DSM_diff(i,j)<s_min && DSM_fin(i,j)>quota_soglia)

    imm_vuota_fin(i,j)=1;
if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata)
    num_err= num_err+1;
end
end
end
end

senzacode=[];
for iii=1 : size(dativet_2,2)

    if dativet_2 (iii) <= s_max && (dativet_2 (iii) > s_min || dativet_1 (iii) < quota_soglia)
        senzacode(end+1)=dativet_2(iii);          % Campione senza le code
    end
end

figure(4)
imshow(imm_vuota_fin)

```

```
title(['OUTLIERS      DoD      con      alpha:      ',num2str(alpha),'%;      ',soglia:
',num2str(soglia),'[m];',num2str(100-(size(senzacode,2)/size(dativet_2,2))*100),'%'])
```

```
      % Media senza le code con aplha applicato al campione
```

```
volume = 0;
```

```
Area_ghiacciaio= GSD^2 * size(senzacode,2);
```

```
for i=1:1:size(senzacode,2);
```

```
    volume = volume + senzacode(i)*(GSD^2);
```

```
end
```

```
senzacode=sort(senzacode);
```

```
for i=1:size(senzacode,2)
```

```
    freq_senzacode(i)=i/size(senzacode,2);
```

```
end
```

```
a=find(senzacode == s_min);
```

```
figure(3)
```

```
set(2,'NumberTitle','off');
```

```
set(2,'Name','CDF DoD con soglie');
```

```
plot(datiDiff,freq_diff,'LineWidth',1.5)
```

```
hold all
```

```

plot(senzacode(1:(a)),freq_senzacode(1:(a)), 'ro', 'MarkerSize', 6, 'LineWidth', 1.5)
plot(senzacode((a):end),freq_senzacode((a):end),'r.', 'MarkerSize', 6, 'LineWidth', 1.5)
grid on
title('ISTOGRAMMA CUMULATO dei DN appartenenti al DoD','FontSize',19)
xline(s_max, 'r--', sprintf('soglia %.2f%%', alpha_def), 'FontSize', 14);
xline(s_max, 'r--','FontSize', 14);
xlabel('Valori DN DOD','FontSize',19)
ylabel('Frequenza','FontSize',19)

x_fill_1 = [ datiDiff(1) datiDiff(1) s_min s_min]; % Coordinata X dell'area
y_fill = [0 1 1 0]; % Coordinata Y dell'area
fill(x_fill_1, y_fill, 'r', 'FaceAlpha', 0.1); % Aggiunge area rossa trasparente
x_fill_2 = [ s_max s_max datiDiff(end) datiDiff(end)]; % Coordinata X3 dell'area
y_fill = [0 1 1 0]; % Coordinata Y dell'area
fill(x_fill_2, y_fill, 'r', 'FaceAlpha', 0.1); % Aggiunge area rossa trasparente

med_senzacode=mean(senzacode);
sqm_senzacode=std(senzacode);

v_senzacode=senzacode-med_senzacode;

m2=0;
m3=0;
m4=0;
for i=1:1:size(v_senzacode,2); % Skewness e curtosi senza code
    m2=m2+v_senzacode(i)^2;

```

```

    m3=m3+v_senzacode(i)^3;
    m4=m4+v_senzacode(i)^4;
end
m2=m2/size(v_senzacode,2);
m3=m3/size(v_senzacode,2);
m4=m4/size(v_senzacode,2);
gam=m3/m2^(3/2);           % Indice Skewness - gamma di fisher
gam2=m4/m2^2-3;          % Indice curtosi - gamma2 di fisher

dativet(:,1)=dativet_1;
dativet(:,2)=dativet_2;
matrice= dativet;
toc

disp('RISULTATI')
disp('.')
disp('alpha applicato sulla coda dx');
disp(alphadx);
disp('alpha applicato sulla coda sx');
disp(alphasx);
disp('Soglie definite dal livello di significatività alpha');
disp(s_max);
disp(s_min);
disp('Intervallo di valori compresi i dati sul fronte non soggetti a soglia');
disp(senzacode(1));
disp(senzacode(end));

```

```

disp('valori sopra soglia:')
disp(size(datiDiff,2)-size(senzacode,2));
disp('% valori sopra soglia:');
disp((((size(datiDiff,2)-size(senzacode,2))*100/size(datiDiff,2)));
disp('mediana');
disp(mediana);
disp('media');
disp(media);
disp('sqm');
disp(sqm);
disp('media senza code')
disp(med_senzacode);
disp('sqm popolazione senza code')
disp(sqm_senzacode);
disp('Skewnees - indice gamma Fisher');
disp(gam);
disp('Curtosi - indice gamma2 Fisher');
disp(gam2);
disp('Variazione di volume');
disp(volume);
disp('Area');
disp(Area_ghiacciaio);

%% Plot Variazione altezza del ghiacciaio in funzione della quota
tic
disp('Calcolo statistica differenze DN in funzione delle quote');

```

```

% Calcola i percentili 2.5% e 97.5% della seconda colonna
p_2_5 = prctile(matrice(:, 2), alpha/2);
p_97_5 = prctile(matrice(:, 2), 100 - alpha/2);

% Filtra i valori che sono dentro il range tra il 2.5% e il 97.5%
righe_filtrate = find(matrice(:, 2) >= p_2_5 & matrice(:, 2) <= p_97_5);

% Seleziona le righe della matrice che sono dentro l'intervallo desiderato
matrice = matrice(righe_filtrate, :);

matrice(:, 1) = floor(matrice(:, 1)); %% tronca parte decimale alle quote

% Se ci sono più valori di quota ne prende solo 1
valori_unici = unique(matrice(:, 1));

% Prealloca la matrice di risultato
matrice_risultato = zeros(length(valori_unici), 6);

% Per ogni valore unico nella prima colonna
for i = 1:length(valori_unici)
    % Trova le righe che corrispondono a quel valore nella prima colonna

    righe_quota = find(matrice(:, 1) == valori_unici(i));

```

```

% Estrai i valori corrispondenti dalla seconda colonna
valori_seconda_colonna = matrice(righe_quota, 2);

% Calcola la media e la deviazione standard
media = mean(valori_seconda_colonna);
std_dev = std(valori_seconda_colonna);

volume_singolaquota =0; %%% per il calcolo preciso dal campione statistico
for ii= size (valori_seconda_colonna,1)
    volume_singolaquota = volume_singolaquota + valori_seconda_colonna(ii)*GSD^2;
end

volume_da_media=media*size (valori_seconda_colonna,1)*GSD^2;

% Memorizza il risultato nella matrice di risultato

matrice_risultato(i, 1) = valori_unici(i); % quote
matrice_risultato(i, 2) = media;
matrice_risultato(i, 3) = std_dev;
matrice_risultato(i, 4) = volume_singolaquota;
matrice_risultato(i,5) = size (valori_seconda_colonna,1) *GSD^2;
matrice_risultato(i,6) = volume_da_media;

% volumi al variare della quota
end

```

```

sigma_up(:,1)=matrice_risultato(:, 2)+matrice_risultato(:, 3);
sigma_up(:,2)=matrice_risultato(:, 2)+2*matrice_risultato(:, 3);
sigma_up(:,3)=matrice_risultato(:, 2)+3*matrice_risultato(:, 3);
sigma_down(:,1)=matrice_risultato(:, 2)-matrice_risultato(:, 3);
sigma_down(:,2)=matrice_risultato(:, 2)-2*matrice_risultato(:, 3);
sigma_down(:,3)=matrice_risultato(:, 2)-3*matrice_risultato(:, 3);

```

```

toc

```

```

%%

```

```

figure (5)

```

```

yyaxis left

```

```

plot(matrice_risultato(:, 1),matrice_risultato(:, 2),'-b','LineWidth', 3)

```

```

hold on

```

```

plot(matrice_risultato(:, 1),sigma_up(:,1),'-k', 'LineWidth', 1)

```

```

hold on

```

```

plot(matrice_risultato(:, 1),sigma_up(:,2),'-k', 'LineWidth', 2)

```

```

hold on

```

```

plot(matrice_risultato(:, 1),sigma_up(:,3),'-k', 'LineWidth', 3)

```

```

hold on

```

```

plot(matrice_risultato(:, 1),sigma_down(:,1),'-k', 'LineWidth', 1 )

```

```

hold on

```

```

plot(matrice_risultato(:, 1),sigma_down(:,2),'-k', 'LineWidth', 2)

```

```

hold on
plot(matrice_risultato(:, 1),sigma_down(:,3),'-k', 'LineWidth', 3)
hold on

title(['Variazione altezza del ghiacciaio in funzione della quota ', num2str(anno_in),'-
',num2str(anno_fin)])
xlabel('Quota s.l.m.[m]')
ylabel('Variazione di altezza del ghiacciaio [m/anno]')
legend('Media','sigma (68.26%)','2sigma (95.44%)','3sigma (99.73%)','Location','southeast')
grid on

yyaxis right
plot(matrice_risultato(:, 1),matrice_risultato(:, 5),'r','LineWidth', 3)
ylabel('Area [m2]')

figure (6)
yyaxis left
%plot(matrice_risultato(:, 1),matrice_risultato(:, 4),'ob','LineWidth', 2)
plot(matrice_risultato(:, 1),matrice_risultato(:, 6),'-b','LineWidth', 2)

title(['Variazione volume del ghiacciaio in funzione della quota ', num2str(anno_in),'-
',num2str(anno_fin)])
xlabel('Quota s.l.m.[m]')
ylabel('Variazione di volume del ghiacciaio [m3/anno]')
legend('Volume reale','Volume medio della quota','Area')
grid on

```

```

yyaxis right
plot(matrice_risultato(:, 1),matrice_risultato(:, 5),'r','LineWidth', 3)
ylabel('Area [m2]')

%% crea variabili per plot quinquennio media e std

quota20242023=matrice_risultato(:, 1);
media20242023=matrice_risultato(:, 2);
volume20242023=matrice_risultato(:,6);
area_plotfinale=matrice_risultato(:,5);

clearvars -except area_plotfinale volume20212020 volume20222021 volume20232022
volume20242023 quota20242023 media20242023 quota20232022 media20232022
quota20222021 media20222021 quota20212020 media20212020;

```

9.6. Script 6: Calcolo delle velocità di arretramento delle fronti glaciali

```
%% p1
clc
clear all

p1_quota2020=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','N5:N1568');
p1_prog_long2020=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','M5:M1568');

p1_quota2021=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','B5:B1568');
p1_prog_long2021=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','A5:A1568');

p1_quota2022=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','E5:E1568');
p1_prog_long2022=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','D5:D1568');

p1_quota2023=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','H5:H1568');
p1_prog_long2023=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','G5:G1568');

p1_quota2024=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','K5:K1568');
p1_prog_long2024=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','J5:J1568');

p1_quota2008_pre=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','Q5:Q394');
p1_prog_long2008_pre=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','P5:P394');

dim=length(p1_quota2024);
```

```

dim_2=length(p1_quota2008_pre);
p1_quota2008=zeros(dim,1);
p1_prog_long2008=ones(dim,1);
for i=1:dim
    p1_prog_long2008(i)=p1_prog_long2024(i);
    for j=1:(dim_2-1)
        if p1_prog_long2024(i)<= p1_prog_long2008_pre(j+1) && p1_prog_long2024(i)>=
p1_prog_long2008_pre(j)
            p1_quota2008(i)= ((p1_prog_long2024(i)- p1_prog_long2008_pre(j+1))/(
p1_prog_long2008_pre(j)-p1_prog_long2008_pre(j+1)))*p1_quota2008_pre(j)-
((p1_prog_long2024(i)- p1_prog_long2008_pre(j))/( p1_prog_long2008_pre(j)-
p1_prog_long2008_pre(j+1)))*p1_quota2008_pre(j);
        end
    end
end
p1_quota2008(p1_quota2008==0)= NaN;

```

figure (1)

```

plot(p1_prog_long2008,p1_quota2008,'y')
hold on
plot(p1_prog_long2020,p1_quota2020,'c')
hold on
plot(p1_prog_long2021,p1_quota2021,'r')
hold on
plot(p1_prog_long2022,p1_quota2022,'b')
hold on

```

```

plot(p1_prog_long2023,p1_quota2023,'g')
hold on
plot(p1_prog_long2024,p1_quota2024,'k')
title('Profilo 1')
xlabel('Progressione longitudinale [m]')
ylabel('Quota [m s.l.m]')
legend('2008','2020','2021','2022','2023','2024','Location','Northwest')
grid on
%% Calcolo ritiro p1

%2008 2020
p1_quota_cut20082020=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','K377:K821');
p1_prog_long_cut20082020=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','J377:J821');
n=length(p1_quota_cut20082020);
p1_d_20082020=zeros(n,1);
for i=1:(n-1)
    p1_d_20082020(i)=sqrt((p1_prog_long_cut20082020(i)-
p1_prog_long_cut20082020(i+1))^2+(p1_quota_cut20082020(i)-
p1_quota_cut20082020(i+1))^2);
end
p1_d_20082020=sum(p1_d_20082020);
p1_d_20082020_annuale=p1_d_20082020/12;

%2020 2021
p1_quota_cut20202021=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','K821:K844');
p1_prog_long_cut20202021=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','J821:J844');
n=length(p1_quota_cut20202021);

```

```

p1_d_20202021=zeros(n,1);
for i=1:(n-1)
    p1_d_20202021(i)=sqrt((p1_prog_long_cut20202021(i)-
p1_prog_long_cut20202021(i+1))^2+(p1_quota_cut20202021(i)-
p1_quota_cut20202021(i+1))^2);
end
p1_d_20202021=sum(p1_d_20202021);

%2021 2022
p1_quota_cut20212022=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','K844:K905');
p1_prog_long_cut20212022=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','J844:J905');
n=length(p1_quota_cut20212022);
p1_d_20212022=zeros(n,1);
for i=1:(n-1)
    p1_d_20212022(i)=sqrt((p1_prog_long_cut20212022(i)-
p1_prog_long_cut20212022(i+1))^2+(p1_quota_cut20212022(i)-
p1_quota_cut20212022(i+1))^2);
end
p1_d_20212022=sum(p1_d_20212022);

%2022 2023
p1_quota_cut20222023=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','K905:K928');
p1_prog_long_cut20222023=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','J905:J928');
n=length(p1_quota_cut20222023);
p1_d_20222023=zeros(n,1);
for i=1:(n-1)

```

```

    p1_d_20222023(i)=sqrt((p1_prog_long_cut20222023(i)-
p1_prog_long_cut20222023(i+1))^2+(p1_quota_cut20222023(i)-
p1_quota_cut20222023(i+1))^2);
end

p1_d_20222023=sum(p1_d_20222023);

%2023 2024

p1_quota_cut20232024=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','K928:K959');
p1_prog_long_cut20232024=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','J928:J959');
n=length(p1_quota_cut20232024);
p1_d_20232024=zeros(n,1);
for i=1:(n-1)

    p1_d_20232024(i)=sqrt((p1_prog_long_cut20232024(i)-
p1_prog_long_cut20232024(i+1))^2+(p1_quota_cut20232024(i)-
p1_quota_cut20232024(i+1))^2);
end

p1_d_20232024=sum(p1_d_20232024);

%2008 2024

p1_quota_cut20082024=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','K377:K959');
p1_prog_long_cut20082024=xlsread('Profili_velocità.xlsx','p1','J377:J959');
n=length(p1_quota_cut20082024);
p1_d_20082024=zeros(n,1);
for i=1:(n-1)

    p1_d_20082024(i)=sqrt((p1_prog_long_cut20082024(i)-
p1_prog_long_cut20082024(i+1))^2+(p1_quota_cut20082024(i)-
p1_quota_cut20082024(i+1))^2);
end

```

```
p1_d_20082024=sum(p1_d_20082024);  
p1_d_20082024_annuale=p1_d_20082024/12;
```

```
p1=zeros(8,1);  
p1(1)=p1_d_20082020;  
p1(2)=p1_d_20082020_annuale;  
p1(3)=p1_d_20202021;  
p1(4)=p1_d_20212022;  
p1(5)=p1_d_20222023;  
p1(6)=p1_d_20232024;  
p1(7)=p1_d_20082024;  
p1(8)=p1_d_20082024_annuale;
```

9.7. Script 7: Analisi degli andamenti di temperatura mediante il modello climatico ERA5

```
%% Script per l'analisi delle temperature di ERA5 scaricabili da sito Climate data store  
%% @Tommaso Mainiero 10-04-2025  
  
close all  
  
clear  
  
clc  
  
  
  
valid_time = ncread('data_stream-oper_stepType-instant.nc', 'valid_time');  
  
correct_time = datetime(1970,1,1)+seconds(valid_time);
```

```

correct_time= correct_time(1:51144);

correct_time_day = datetime([2019,1,1]):1:datetime(2024,10,31);

temperature = ncread('data_stream-oper_stepType-instant.nc','t2m');
temperature = squeeze(temperature);
temperature = temperature - 273.15;
temperature = temperature (1:51144);
temperature_nofluttuazioni=movmean(temperature,31,'omitnan');

figure(4)
set(4,'NumberTitle','off');
set(4,'Name','TEMPERATURA ORARIA ERA 5');
hold all
grid on
plot(correct_time, temperature, 'LineWidth',1);
plot(correct_time, temperature_nofluttuazioni,'LineWidth',1.5);
title('TEMPERATURA ORARIA ERA 5' , 'FontSize',12)
legend('ERA5','ERA 5 con media mobile', 'FontSize',12,'Location','southeast');
ylabel('Temperature [°C]','FontSize',12)

temperature_day = reshape(temperature, 24,51144/24);
temperature_day = nanmean(temperature_day);
temperature_day_nofluttuazioni=movmean(temperature_day , 31,'omitnan');
std=movstd(temperature_day , 31,'omitnan');

```

```

temperature_day_nofluttuazioni_std_max= temperature_day_nofluttuazioni+ 2*std;
temperature_day_nofluttuazioni_std_min= temperature_day_nofluttuazioni- 2*std;

%temperature_arpa = dati_arpa(:,5);

figure(5);
set(5,'NumberTitle','off');
set(5,'Name','TEMPERATURA GIORNALIERA');
hold all; grid on;
plot(correct_time_day(:), temperature_day (:),'LineWidth',1,'LineStyle','--');
plot(correct_time_day, temperature_day_nofluttuazioni,'r','LineWidth',1.5);
plot(correct_time_day, temperature_day_nofluttuazioni_std_max,'r--','LineWidth',1.5);
plot(correct_time_day, temperature_day_nofluttuazioni_std_min,'r--','LineWidth',1.5);
title('TEMPERATURA GIORNALIERA' , 'FontSize',12);
legend('ERA5','ERA 5 media','sigma 95%','FontSize',12,'Location','southeast');
ylabel('Temperature [°C]','FontSize',12)
xtickangle(45);

figure(6);
set(5,'NumberTitle','off');
set(5,'Name','TEMPERATURA GIORNALIERA');
hold on; grid on;
plot(correct_time_day(274:639),          temperature_day(274:639),'LineWidth',0.5,'LineStyle','--',
'Color','r');
plot(correct_time_day(274:639),
temperature_day_nofluttuazioni(274:639),'LineWidth',1.5,'Color','r');

```

```

plot(correct_time_day(274:639),      temperature_day(640:1005),'LineWidth',0.5,'LineStyle','--
','Color','b');

plot(correct_time_day(274:639),
temperature_day_nofluttuazioni(640:1005),'LineWidth',1.5,'Color','b');

plot(correct_time_day(274:639),      temperature_day(1005:1370),'LineWidth',0.5,'LineStyle','--
','Color','g');

plot(correct_time_day(274:639),
temperature_day_nofluttuazioni(1005:1370),'LineWidth',1.5,'Color','g');

plot(correct_time_day(274:639),      temperature_day(1370:1735),'LineWidth',0.5,'LineStyle','--
','Color','k');

plot(correct_time_day(274:639),
temperature_day_nofluttuazioni(1370:1735),'LineWidth',1.5,'Color','k');

plot(correct_time_day(274:639),      temperature_day(1735:2100),'LineWidth',0.5,'LineStyle','--
','Color','c');

plot(correct_time_day(274:639),
temperature_day_nofluttuazioni(1735:2100),'LineWidth',1.5,'Color','c');

title('TEMPERATURA GIORNALIERA' , 'FontSize',12);

xtickformat('dd-MMM');

legend('2020','2020','2021','2021','2022','2022','2023','2023','2024','2024','FontSize',12,'Location','
southwest');

ylabel('Temperature [°C]','FontSize',12)

xtickangle(45);

temperature_day = temperature_day';

temp_estive_2020=[temperature_day(518:670)];

temp_estive_2021=[temperature_day(883:1035)];

temp_estive_2022=[temperature_day(1248:1400)];

temp_estive_2023=[temperature_day(1613:1765)];

```

```

temp_estive_2024=[temperature_day(1979:2131)];

date_estate = datetime(2000, 6, 1):datetime(2000, 10, 31);

figure(7);
set(7,'NumberTitle','off');
set(7,'Name','TEMPERATURE ESTIVE');
plot(date_estate,temp_estive_2020,'LineWidth',1.5)
hold on; grid on
plot(date_estate,temp_estive_2021,'LineWidth',1.5)
plot(date_estate,temp_estive_2022,'LineWidth',1.5)
plot(date_estate,temp_estive_2023,'LineWidth',1.5)
plot(date_estate,temp_estive_2024,'LineWidth',1.5)
xtickformat('dd-MMM');
legend('2020','2021','2022','2023','2024','FontSize',12,'Location','southwest')
ylabel('Temperature [°C]','FontSize',12)
title('TEMPERATURE ESTIVE','FontSize',12);
xtickangle(45);

```

9.8. Script 8: Algoritmo per il riconoscimento dei crepacci e calcolo semi-automatico degli spostamenti

```

%%%%%%%%%%%%%% Programma per il calcolo di spostamenti di crepacci mediante
%%%%%%%%%%%%%% utilizzo di analisi differenziale tra DSM e algoritmi di autocorrelazione
fotogrammetrica.

%%%%%%%%%%%%%%                                04/12/2024 Tommaso Mainiero

```

```
clc
```

```
close all
```

```
clear all
```

```
tic
```

```
%%          %%%%%%%%%%          Dati      di      input  
%%%%%%%%%
```

```
disp('Load dati')
```

```
%%%%%%%%%          INSERIRE      DATI  
%%%%%%%%%
```

```
%% %% %% Dati noti
```

```
%GSD= 0.5; %%%!!!!!!! da DSM
```

```
DSM_fin= imread('DSM_2023crepacci.tif'); %%% anno fin>anno in
```

```
DSM_in=imread('DSM_2022crepacci.tif');
```

```
%indice_corr_minimo=0.5;      %%!!!!!!! affinché il programma lo consideri come possibile  
risultato
```

```
%spostamento_max_accettabile=50; %%!!!!!!! spostamento massimo dei crepacci ammissibile  
[m]
```

```
%% %% %% Vengono chiesti dal programma
```

```
GSD = input('Inserisci il valore di GSD (0.5) [m]: ');
```

```
if isnumeric(GSD)
```

```

else
    disp('Errorey: Inserisci un valore numerico.');
```

end

```

% nome_DSM_fin = input('Inserisci il nome del DSM più recente: ');
% nome_DSM_in = input('Inserisci il nome del DSM più datato: ');
% DSM_fin= imread('nome_DSM_fin'); %%% anno fin>anno in
% DSM_in=imread('nome_DSM_in');
```

```

indice_corr_minimo= input('Inserisci il valore di indice di correlazione minimo (consigliato 0.5) :
');
if isnumeric(indice_corr_minimo)

else
    disp('Errore: Inserisci un valore numerico.');
```

end

```

spostamento_max_accettabile= input('Inserisci il valore dello spostamento massimo accettabile
(consigliato 80/100) [m]: ');

if isnumeric(spostamento_max_accettabile)

else
    disp('Errore: Inserisci un valore numerico.');
```

end

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Genera Variazione DSM tra DSM
righe_1=size(DSM_in,1);
col_1=size(DSM_fin,2);
```

```
nodata=3.4e+38;      %%%%%%%3.4*10^38;  %arrotonda per difetto  NODATA_value  -  
3.4028234663852885981e+38
```

```
for i=1:1:righe_1    %%%% genera Matrice Diff DSM  
    for j=1:1:col_1  
        if DSM_fin(i,j)>0 && DSM_in(i,j)>0 %%% considerare solo valori positivi, quindi non Nan  
            DSM_diff(i,j)=DSM_fin(i,j)-DSM_in(i,j);  
        else  
            DSM_diff(i,j)=nodata;  
        end  
    end  
end  
end
```

```
%%%%%%%% Statistica Diff DSM per comprendere le soglie da imporre per  
%%%%%%%% l'identificazione dei crepacci
```

```
righe=size(DSM_diff,1);
```

```
col=size(DSM_diff,2);
```

```
cont_dativet=0;
```

```
for i=1:1:righe
```

```
    for j=1:1:col
```

```
        if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata);
```

```

        cont_dativet=cont_dativet+1;
        dativet(cont_dativet)=DSM_diff(i,j);
    end
end
end

dativet=sort(dativet);
freq=zeros(1,size(dativet,2));

for i=1:size(dativet,2)
    freq(i)=i/size(dativet,2);
end

figure(1)
plot(dativet,freq)
title('ISTOGRAMMA CUMULATO dei DN appartenenti alla variazione tra DSM')
xlabel('Valori DN')
ylabel('Frequenza')
toc

satisfied = false; % Inizializza stato di soddisfazione
while ~satisfied

%%%%%%%%%%%%% INSERIRE DATI DA ISTOGRAMMA CUMULATO
%%%%%%%%%%%%%

```

```

%%%%% Dati noti

% sogliapositiva=1.9; %%%%%%%%%!!!!!!! Da inserire vedendo grafico della cumulata

% soglianegativa=-3;

% classi=3; %%%%%%%%% numero di classi con cui si distribuiscono i DN nella

% rappresentazione della var di quota dei crepacci. Più è alto il numero di

% classi più sarà definita l'immagine campione e di ricerca

%%%%%%%% Vengono chiesti dal programma

sogliapositiva=input('Inserisci il valore di soglia positiva (consigliato 1.9) [m]: '); %% i valori si
definiscono secondo il seguente principio: Se il pixel della diff DSM ha DN>0 rappresenta
posizione iniziale, se DN<<0 rappresenta posizione finale.

if isnumeric(sogliapositiva)

    else

        disp('Errore: Inserisci un valore numerico.');
```

end

```

soglianegativa=input('Inserisci il valore di soglia negativa (consigliato -3.2) [m]: ');

if isnumeric(sogliapositiva)

    else

        disp('Errore: Inserisci un valore numerico.');
```

end

classi=input('Inserisci il valore di classi di toni di grigio desiderate (consigliato 255 8 bit): ');
%%%%%%%% numero di classi con cui si distribuiscono i DN nella rappresentazione della var di
quota dei crepacci. Più è alto il numero di classi più sarà definita l'immagine campione e di ricerca

if isnumeric(sogliapositiva)

else

disp('Errore: Inserisci un valore numerico.');

end

%%%%%%%%
%%%%%%%%

%%%%%%%% GENERA IMMAGINI DA VAR DSM
%%%%%%%%

%%%%%%%% Caso 2023-2022. Se il pixel della diff DSM ha DN>0 rappresenta
%%%%%%%% posizione iniziale, se DN<<0 rappresenta posizione finale. Questo
%%%%%%%% processo è definito dalle soglie

disp('Genera Immagini 2 bit dei crepacci nei due anni consecutivi')

Immagine_partenza_binaria=zeros(righe,col);

Immagine_arrivo_binaria=zeros(righe,col);

for i=1:1:righe

for j=1:1:col

if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata)

```

if DSM_diff(i,j)>sogliapositiva
    Immagine_partenza_binaria(i,j)=1;    %% Genera immagini Crepaccio anno iniziale
end

if DSM_diff(i,j)<soglianegativa    %% Genera immagini Crepaccio anno finale
    Immagine_arrivo_binaria(i,j)=1;
end

end

end

end
end

```

```

figure(2)
imshow(Immagine_partenza_binaria)
title('Immagine di partenza 2 bit')

```

```

figure(3)
imshow(Immagine_arrivo_binaria)
title('Immagine di ricerca 2 bit')

```

```

toc
%%%%%%%%%% CASO CON TONI DI GRIGIO E NON BINARIO GENERA IMMAGINI
DA VAR DSM %%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%% Caso 2023-2022. Se il pixel della diff DSM ha DN>0 rappresenta

```

```

%%%%%%%%% posizione iniziale, se DN<<0 rappresenta posizione finale. Questo
%%%%%%%%% processo è definito dalle soglie
disp('Genera Immagini 8 bit dei crepacci nei due anni consecutivi')

massimo=max(dativet);
minimo=min(dativet);

%%%%%%%%% per inserire i toni di grigio

for i=1:classi
    s_n(1)= soglianegativa;
    s_n(i+1)= soglianegativa - i*abs(minimo-soglianegativa)/classi;
end

for i=1:classi
    s_p(1)= sogliapositiva;
    s_p(i+1)= sogliapositiva + i*abs(massimo-sogliapositiva)/classi;
end

Immagine_partenza_tonigrigio=zeros(righe,col);%%%%%%%%% Genera pattern casuale sullo sfondo
dell'immagine aiutando la determinazione

Immagine_arrivo_tonigrigio=zeros(righe,col);

for i=1:1:righe
    for j=1:1:col
        if abs(DSM_diff(i,j))<abs(nodata);
            for k=1:classi

```

```

    if s_n(k) > DSM_diff(i,j) && DSM_diff(i,j) > s_n(k+1);
        Immagine_arrivo_tonigrigio(i,j)=fix(255*k/classi);           %% Genera immagini
Crepaccio anno iniziale
    end
end

for k=1:classi
    if s_p(k)<DSM_diff(i,j) && DSM_diff(i,j)<s_p(k+1);
        Immagine_partenza_tonigrigio(i,j)=fix(255*k/classi);       %% Genera immagini
Crepaccio anno iniziale
    end
end

end

end

end

figure(4)
imshow(Immagine_partenza_tonigrigio,[0,255])
title('Immagine di partenza 8 bit')
colormap(gray);

figure(5)
imshow(Immagine_arrivo_tonigrigio,[0,255])

```

```

title('Immagine di ricerca 8 bit')

colormap(gray);

contatore_figure=6; %% risolvo problema sovrapposizione dei plottaggi

n=size(Immagine_arrivo_tonigrigio,2); %%%%%%%%%%% dimensioni matrice per definire al
programma come la matrice campione si deve spostare su immagine di ricerca
m=size(Immagine_arrivo_tonigrigio,1);

%%%%%%%%%%%%%% Figura complessiva

immagine_complessiva_binaria(:,1)=Immagine_partenza_binaria;          %%% genera unica
immagine con sia il crepaccio in partenza che in arrivo

immagine_complessiva_binaria(:,2)=Immagine_arrivo_binaria;

immagine_complessiva_binaria(:,3)=zeros(size(Immagine_partenza_binaria));

contatore_figure=contatore_figure+1;

figure(contatore_figure)

imshow(immagine_complessiva_binaria)

hold on

title('Immagine complessiva')

toc

% Chiedi conferma all'utente

userInput = input('Sei soddisfatto con queste immagini di lavoro? (y/n): ', 's');

```

```

if strcmpi(userInput, 'y')
    satisfied = true; % L'utente è soddisfatto, esce dal ciclo while
elseif strcmpi(userInput, 'n')
    disp('Ripeto la parte di script per questa iterazione...');
    % Il ciclo while continuerà, ripetendo il blocco di codice sopra
else
    disp('Risposta non valida. Inserisci "y" o "n".');
end
end
end

```

%%%%% INSERIRE DATO DALLA VISUALIZZAZIONE DELLE IMMAGINI E DEI
 CREPACCI %%%%%%%%%%

%%%%% Dati noti

numero_crepacci= 3 ;%%%%%%%%%%!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

%%%%% vengono chiesti dal programma

numero_crepacci=input('Inserisci il numero di crepacci da analizzare: ');

if isnumeric(numero_crepacci)

else

disp('Errore: Inserisci un valore numerico.');

end

%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%

```

%% %%% Ritaglia i campioni da Imm_1 di partenza

%% %!!!!!! Regole per la selezione, prima selezionare tutti i vertici in alto a
%%% sinistra dei possibili riquadri, poi selezionare tutti i vertici in basso
%%% a destra dei riquadri seguendo lo stesso ordine

satisfied = false; % Inizializza stato di soddisfazione
while ~satisfied

contatore_figure=contatore_figure+1;
figure(contatore_figure)
imshow(Immagine_partenza_tonigrigio)

title('SELEZIONARE IMMAGINI SAGOMA')
xlabel('Regole per la selezione dei riquadri nella command window')
disp ('Regole per la selezione, prima selezionare tutti i vertici in alto a sinistra dei possibili riquadri,
poi selezionare tutti i vertici in basso a destra seguendo lo stesso ordine')

[g1,h1] = ginput(numero_crepacci); %%% selezione riquadro nell'immagine
[g2,h2] = ginput(numero_crepacci);

for i=1:numero_crepacci %% visualizzo il campione selezionato e genero le immagini campione
da cui fare statistica

imm_campione_tonigrigio=Immagine_partenza_tonigrigio(h1(i):h2(i),g1(i):g2(i));

```

```

imm_campione_binaria=Immagine_partenza_binaria(h1(i):h2(i),g1(i):g2(i));
Immagini_campione_binaria{i}=imm_campione_binaria; %% salvo le immagini campione
generate

Immagini_campione_tonigrigio{i}=imm_campione_tonigrigio;

imm_campione_tonigrigio_p=Immagine_partenza_tonigrigio(h1(i):h2(i),g1(i):g2(i)); %%
immagine per la visualizzazione del ritaglio

contatore_figure=contatore_figure+1;
figure(contatore_figure)
imshow(imm_campione_tonigrigio_p,[0,255]) %% visualizza le immagini di lavoro
colormap(gray);
hold on
plot(size(imm_campione_tonigrigio_p,2)/2,size(imm_campione_tonigrigio_p,1)/2,'ro')
title(['Immagine sagoma 8 Bit, Campione:',num2str(i)])
end
toc

% Chiedi conferma all'utente

userInput = input('Sei soddisfatto delle immagini sagoma estratte? (y/n): ', 's');

if strcmpi(userInput, 'y')
    satisfied = true; % L'utente è soddisfatto, esce dal ciclo while
elseif strcmpi(userInput, 'n')
    disp('Ripeto la parte di script per questa iterazione...');
    % Il ciclo while continuerà, ripetendo il blocco di codice sopra

```

```

else
    disp('Risposta non valida. Inserisci "y" o "n".');
end
end

%% Fa analisi per ogni campione
for i=1:numero_crepacci %% analizza un crepaccio alla volta

imm_campione_tonigrigio=Immagini_campione_tonigrigio{i}; %% immagine campione da
utilizzare

imm_campione_binaria=Immagini_campione_binaria{i};

p(i)=size(imm_campione_binaria,1); %% numero righe campione
q(i)=size(imm_campione_binaria,2); %% numero colonne campione

%%% statistica sul campione selezionato per entrambe le immagini binario e toni di
%%% grigio

clear campione_binario campione_tonigrigio

cont_1=1;

for iii=1:p(i) %%%% righe
    for jjj=1:q(i) %%%% colonne
        campione_binario(cont_1,1)=imm_campione_binaria(iii,jjj);
        campione_tonigrigio(cont_1,1)=imm_campione_tonigrigio(iii,jjj);
        cont_1=cont_1+1;
    end
end

```

```

end

campione_binario= double(campione_binario);
campione_binario=sort( campione_binario);
campione_tonigrigio= double(campione_tonigrigio);
campione_tonigrigio=sort(campione_tonigrigio);

sigma_campione_tonigrigio=std(campione_tonigrigio);

sigma_campione_binario=std(campione_binario);

%% Ricerca del campione in immagine di arrivo
disp(['Ricerca per immagine sagoma: ',num2str(i)])

contatore_Matrici_significative_binario=0; %% inizializzazione dei vettori e matrici risultato per
ogni campione
contatore_Matrici_significative_tonigrigio=0;

clear  indici_correlazione_binario  matrix_confronto_binario  spostamento_EST_binario
spostamento_NORD_binario  coordinate_iniziali_binario  coordinate_finali_binario
indici_correlazione_tonigrigio  matrix_confronto_tonigrigio  spostamento_EST_tonigrigio
spostamento_NORD_tonigrigio  coordinate_iniziali_tonigrigio  coordinate_finali_tonigrigio
confronto_binario confronto_tonigrigio

for iii=1:(m-p(i)+1)  % righe  Ciclo For per ricercare il crepaccio corretto nell'immagine di
arrivo

    for jjj=1:(n-q(i)+1) % colonne

```

```

spostamento_EST=(jjj-g1(i))*GSD; %%% calcola spostamento tra le due matrici,
spostamento_NORD=(iii-h1(i))*GSD; %%%se maggiore dello spostamento massimo
accettabile non svolge il processo probabilistico di identificazione

spostamento_risultante=sqrt(spostamento_EST^2+spostamento_NORD^2);

if spostamento_risultante < spostamento_max_accettabile %%% Spostamento plausibile, procedo
con analisi statistica immagine confronto

Imm_confronto_binaria=Immagine_arrivo_binaria(iii:(p(i)+(iii-1)),jjj:(q(i)+(jjj-1)));
Imm_confronto_tonigrigio=Immagine_arrivo_tonigrigio(iii:(p(i)+(iii-1)),jjj:(q(i)+(jjj-1)));

% Creo vettore campione di confronto e calcolo std e varianza

cont_1=1;
for ii=1:p(i)
    for jj=1:q(i)
        confronto_binario(cont_1,1)= Imm_confronto_binaria(ii,jj);
        confronto_tonigrigio(cont_1,1)= Imm_confronto_tonigrigio(ii,jj);
        cont_1=cont_1+1;
    end
end

confronto_binario=double(confronto_binario);
confronto_binario=sort(confronto_binario);
confronto_tonigrigio=double(confronto_tonigrigio);
confronto_tonigrigio=sort(confronto_tonigrigio);

```

```

sigma_confronto_binario=std(confronto_binario);
sigma_confronto_tonigrigio=std(confronto_tonigrigio);

%%% calcolo indice di correlazione note varianze e covarianze delle
%%% varabili campione e confronto

covarianza_binaria=sum((campione_binario-mean(campione_binario)).*(confronto_binario-
mean(confronto_binario)))/size(confronto_binario,1);
indice_correlazione_binario=
covarianza_binaria/(sigma_confronto_binario*sigma_campione_binario);

covarianza_tonigrigio=sum((campione_tonigrigio-
mean(campione_tonigrigio)).*(confronto_tonigrigio-
mean(confronto_tonigrigio)))/size(confronto_tonigrigio,1);
indice_correlazione_tonigrigio=
covarianza_tonigrigio/(sigma_confronto_tonigrigio*sigma_campione_tonigrigio);

if abs(indice_correlazione_binario)>indice_corr_minimo    %% ha probabilmente trovato una
possibile immagine del crepaccio

    contatore_Matrici_significative_binario=contatore_Matrici_significative_binario+1;
%salvami Risultati

```

```
indici_correlazione_binario(contatore_Matrici_significative_binario)=abs(indice_correlazione_b  
inario);
```

```
matrix_confronto_binario{contatore_Matrici_significative_binario}=Imm_confronto_binaria;
```

```
spostamento_EST_binario(contatore_Matrici_significative_binario)=spostamento_EST;
```

```
spostamento_NORD_binario(contatore_Matrici_significative_binario)=spostamento_NORD;
```

```
coordinate_iniziali_binario(contatore_Matrici_significative_binario,:)=g1(i),h1(i);
```

```
coordinate_finali_binario(contatore_Matrici_significative_binario,:)=iii,jjj];
```

```
end
```

```
if abs(indice_correlazione_tonigrigio)>indice_corr_minimo %% ha probabilmente trovato una  
possibile immagine del crepaccio
```

```
contatore_Matrici_significative_tonigrigio=contatore_Matrici_significative_tonigrigio+1;
```

```
%salvami Risultati
```

```
indici_correlazione_tonigrigio(contatore_Matrici_significative_tonigrigio)=abs(indice_correlazi  
one_tonigrigio);
```

```
matrix_confronto_tonigrigio{contatore_Matrici_significative_tonigrigio}=
```

```
Imm_confronto_tonigrigio;
```

```
spostamento_EST_tonigrigio(contatore_Matrici_significative_tonigrigio)=spostamento_EST;
```

```
spostamento_NORD_tonigrigio(contatore_Matrici_significative_tonigrigio)=spostamento_NOR  
D;
```

```
coordinate_iniziali_tonigrigio(contatore_Matrici_significative_tonigrigio,:)=g1(i),h1(i);
```

```
coordinate_finali_tonigrigio(contatore_Matrici_significative_tonigrigio,:)=iii,jjj];
```

```
end
```

```
end
```

```
    end
```

```
end
```

```
toc
```

```
%%%%%%%%%%%%% VISUALIZZAZIONE DEI RISULTATI PER OGNI  
CREPACCIO %%%%%%%%%%
```

```
%%%%%%%%%% Binario %%%%%%%%%%
```

```
disp(['Risultato 2 bit, campione: ',num2str(i)])
```

```
if contatore_Matrici_significative_tonigrioso ~= 0
```

```
[indice_correlazione_binario_max,posizione_max_binario_1]=max(indici_correlazione_binario)
```

```
; %% trovo le soluzioni con indice di correlazione massimo
```

```
pos_1=find(indici_correlazione_binario == indice_correlazione_binario_max);
```

```
posizione_max_binario_2 = pos_1(:,end);
```

```
contatore_figure=contatore_figure+1; %% visualizzo immagine di confronto soluzione INIZIALE
```

```
figure(contatore_figure)
```

```
imshow(matrix_confronto_binario{posizione_max_binario_1})
```

```
title(['Prima immagine bersaglio 2 bit, crepaccio: ',num2str(i);'INDICE DI CORRELAZIONE  
MASSIMO: ',num2str(indice_correlazione_binario_max)],'FontSize',12)
```

```
contatore_figure=contatore_figure+1; %% visualizzo immagine di confronto soluzione FINALE
```

```
figure(contatore_figure)
```

```
imshow(matrix_confronto_binario{posizione_max_binario_2})
```

```
title(['Ultima Immagine bersaglio 2 bit, crepaccio ',num2str(i),';INDICE DI CORRELAZIONE  
MASSIMO: ',num2str(indice_correlazione_binario_max)],'FontSize',12)
```

```
coordinate_iniziali_binario=coordinate_iniziali_binario(posizione_max_binario_1,:);    %%  
coordinate iniziali soluzione INIZIALE
```

```
coordinate_finali_binario=coordinate_finali_binario(posizione_max_binario_1,:);
```

```
spostamento_EST_binario=(spostamento_EST_binario(posizione_max_binario_1)+spostamento  
_EST_binario(posizione_max_binario_1))/2;    %% spostamento
```

```
spostamento_NORD_binario=(spostamento_NORD_binario(posizione_max_binario_1)+sposta  
mento_NORD_binario(posizione_max_binario_2))/2;
```

```
spostamento_risultante_binario_fin=sqrt(spostamento_EST_binario^2+spostamento_NORD_bin  
ario^2);
```

```
spostamento_EST_binario_tot(i)=spostamento_EST_binario/GSD;    %% salvataggio spostamento  
di quel campione
```

```
spostamento_NORD_binario_tot(i)=spostamento_NORD_binario/GSD;
```

```
spostamento_EST_binario_plot(i)=spostamento_EST_binario;    %% salvataggio spostamento di  
quel campione
```

```
spostamento_NORD_binario_plot(i)=-spostamento_NORD_binario;
```

```
coordinatecentrali_iniziali_binario_EST=coordinate_iniziali_binario(1,1)+q(i)/2;    %%  
coordinate nel centro immagine (sistema fiduciale)
```

```
coordinatecentrali_iniziali_binario_NORD=coordinate_iniziali_binario(1,2)+p(i)/2;
```

```
coordinatecentrali_iniziali_binario_EST_tot(i,1)=coordinatecentrali_iniziali_binario_EST;  
%%salvataggio coordinate per figura complessiva
```

```
coordinatecentrali_iniziali_binario_NORD_tot(i,1)=coordinatecentrali_iniziali_binario_NOR  
D;
```

```
coordinatecentrali_iniziali_binario_EST_tot(i,2)=coordinatecentrali_iniziali_binario_EST+spo  
stamento_EST_binario_tot(i);
```

```
coordinatecentrali_iniziali_binario_NORD_tot(i,2)=coordinatecentrali_iniziali_binario_NOR  
D+spostamento_NORD_binario_tot(i);
```

```
disp(['spostamento EST 2 bit, immagine sagoma: ',num2str(i)])
```

```
disp(spostamento_EST_binario)
```

```
disp(['spostamento NORD 2 bit, immagine sagoma: ',num2str(i)])
```

```
disp(-spostamento_NORD_binario)
```

```
disp(['spostamento 2bit, immagine sagoma: ',num2str(i)])
```

```
disp(spostamento_risultante_binario_fin)
```

```
if spostamento_risultante_binario_fin > spostamento_max_accettabile
```

```
    disp('Errore: Lo spostamento è maggiore dello spostamento massimo')
```

```
end
```

```
%%%%%%%% toni di grigio %%%%%%%%%%
```

```
disp(['Risultato 8 bit campione:',num2str(i)]) %% uaguale a prima ma per toni di grigio
```

```
[indice_correlazione_tonigrigio_max,posizione_max_tonigrigio_1]=max(indici_correlazione_to  
nigrigio);
```

```
pos_2=find(indici_correlazione_tonigrigio == indice_correlazione_tonigrigio_max);
```

```
posizione_max_tonigrigio_2= pos_2(:,end);
```

```

contatore_figure=contatore_figure+1;
figure(contatore_figure)
imshow(matrix_confronto_tonigrigio{posizione_max_tonigrigio_1},[0,255])
colormap(gray);
title(['Prima immagine bersaglio 8 bit, crepaccio ',num2str(i), '; INDICE DI CORRELAZIONE
MASSIMO: ',num2str(indice_correlazione_tonigrigio_max)],'FontSize',12)

```

```

contatore_figure=contatore_figure+1;
figure(contatore_figure)
imshow(matrix_confronto_tonigrigio{posizione_max_tonigrigio_2},[0,255])
colormap(gray);
title(['Ultima immagine bersaglio 8 bit, crepaccio ',num2str(i), '; INDICE DI CORRELAZIONE
MASSIMO: ',num2str(indice_correlazione_tonigrigio_max)],'FontSize',12)

```

```

coordinate_iniziali_tonigrigio=coordinate_iniziali_tonigrigio(posizione_max_tonigrigio_1,:);
coordinate_finali_tonigrigio=coordinate_finali_tonigrigio(posizione_max_tonigrigio_1,:);

```

```

spostamento_EST_tonigrigio=(spostamento_EST_tonigrigio(posizione_max_tonigrigio_1)+spostamento_EST_tonigrigio(posizione_max_tonigrigio_2))/2;

```

```

spostamento_NORD_tonigrigio=(spostamento_NORD_tonigrigio(posizione_max_tonigrigio_1)+spostamento_NORD_tonigrigio(posizione_max_tonigrigio_2))/2;

```

```

spostamento_risultante_tonigrigio_fin=sqrt(spostamento_EST_tonigrigio^2+spostamento_NORD_tonigrigio^2);

```

```

spostamento_EST_tonigrigio_tot(i)=spostamento_EST_tonigrigio/GSD;

```

```

spostamento_NORD_tonigrigio_tot(i)=spostamento_NORD_tonigrigio/GSD;

```

```

spostamento_EST_tonigrigio_plot(i)=spostamento_EST_tonigrigio;      %%    salvataggio
spostamento di quel campione

spostamento_NORD_tonigrigio_plot(i)=-spostamento_NORD_tonigrigio;

coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_EST=coordinate_iniziali_tonigrigio(1,1)+q(i)/2;
coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_NORD=coordinate_iniziali_tonigrigio(1,2)+p(i)/2;

coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_EST_tot(i,1)=coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_ES
T;
coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_NORD_tot(i,1)=coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_
NORD;

coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_EST_tot(i,2)=coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_ES
T+spostamento_EST_tonigrigio_tot(i);
coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_NORD_tot(i,2)=coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_
NORD+spostamento_NORD_tonigrigio_tot(i);

disp(['spostamento EST 8 bit, immagine sagoma:',num2str(i)])
disp(spostamento_EST_tonigrigio)
disp(['spostamento NORD 8 bit, immagine sagoma:',num2str(i)])
disp(-spostamento_NORD_tonigrigio)
disp(['spostamento risultante 8 bit, immagine sagoma:',num2str(i)])
disp(spostamento_risultante_tonigrigio_fin)
if spostamento_risultante_tonigrigio_fin > spostamento_max_accettabile
    disp('Errore: Lo spostamento è maggiore dello spostamento massimo')
end

```

```

else
    disp(['Diminuire indice di correlazione minimo per Il campione ',num2str(i)])
end
end

%%%%%%%%%%%% Figura complessiva

immagine_complessiva_binaria(:,1)=Immagine_partenza_binaria;          %%% genera unica
immagine con sia il crepaccio in partenza che in arrivo
immagine_complessiva_binaria(:,2)=Immagine_arrivo_binaria;
immagine_complessiva_binaria(:,3)=zeros(size(Immagine_partenza_binaria));

immagine_complessiva_tonigrigio(:,1)=Immagine_partenza_tonigrigio;
immagine_complessiva_tonigrigio(:,2)=Immagine_arrivo_tonigrigio;
immagine_complessiva_tonigrigio(:,3)=zeros(size(Immagine_partenza_tonigrigio));
immagine_complessiva_tonigrigio=uint8(immagine_complessiva_tonigrigio);

contatore_figure=contatore_figure+1;
figure(contatore_figure)
imshow(immagine_complessiva_binaria)
hold on

for i=1:numero_crepanci          %%% Aggiungo lo spotamento nell'immagine
plot3(coordinatecentrali_iniziali_binario_EST_tot(i,:),coordinatecentrali_iniziali_binario_NO
RD_tot(i,:),[0,0],'w', 'LineWidth', 2);
hold on

```

```

text(coordinatecentrali_iniziali_binario_EST_tot(i,1)+spostamento_EST_binario_plot(i)/(GSD)
,coordinatecentrali_iniziali_binario_NORD_tot(i,1),['EST
num2str(spostamento_EST_binario_plot(i))], 'FontSize', 18, 'Color', 'w');

hold on

text(coordinatecentrali_iniziali_binario_EST_tot(i,1),coordinatecentrali_iniziali_binario_NOR
D_tot(i,1)-spostamento_NORD_binario_plot(i)/(GSD),['NORD
num2str(spostamento_NORD_binario_plot(i))], 'FontSize', 18, 'Color', 'w');

end

grid on

legend('ROSSO= partenza crepaccio; VERDE= arrivo crepaccio','Location', 'southwest')

title('Risultati spostamenti 2 bit')

datacursormode on;

contatore_figure=contatore_figure+1;

figure(contatore_figure)

imshow(immagine_complessiva_tonigrigio)

hold on

for i=1:numero_crepacci

plot3(coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_EST_tot(i,:),coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio
_NORD_tot(i,:),[0,0], 'w', 'LineWidth', 2);

hold on

text(coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_EST_tot(i,1)+spostamento_EST_tonigrigio_plot(i)/(
GSD),coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_NORD_tot(i,1),['EST
num2str(spostamento_EST_tonigrigio_plot(i))], 'FontSize', 18, 'Color', 'w');

hold on

```

```
text(coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_EST_tot(i,1),coordinatecentrali_iniziali_tonigrigio_
NORD_tot(i,1)-spostamento_NORD_tonigrigio_plot(i)/(GSD),['NORD
num2str(spostamento_NORD_tonigrigio_plot(i))'], 'FontSize', 18, 'Color', 'w');

end

grid on

legend('ROSSO = Partenza crepaccio; VERDE = Arrivo crepaccio','Location', 'southwest')

title('Risultati spostamenti 8 bit')

toc

datacursormode on;
```

10. Bibliografia

Beniston, M., 2006. Mountain weather and climate: A general overview and a focus on climatic change in the Alps.

Chiarle, M. et al., 2022. Campagna glaciologica annuale dei ghiacciai italiani 2022.

Chiarle, M. et al., 2023. Campagna glaciologica annuale dei ghiacciai italiani 2023.

Cina, A., 2002. *Trattamento delle misure topografiche*. s.l.:CELID.

Cina, A., 2025. *Corso di Geomatica 2024-2025*. s.l.:Politecnico di Torino.

Copernicus, s.d. Reconstructed glacier area and volume changes in the European Alps since the Little Ice Age. <https://tc.copernicus.org/articles/19/753/2025/#:~:text=The%20total%20glacier%20volume%20of,237%20to%20336%20km3>.

Desio, A., 1997. *I ghiacciai del gruppo Ortles-Cevedale*. Torino: C.N.R.- C.G.I.

Dramis, F. & Federici, P. R., s.d. Morfologia glaciale e periglaciale.

Fox-Kemper, et al., 2021. Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis.. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

geographic, N., s.d. (<https://www.nationalgeographic.com/environment/article/climate-change>).

IPCC, 2023. AR6 Synthesis Report: Climate Change.

IPCC, 2023. High Mountain Areas AR6.

Italiano, C. g., 2022. Le campagne glaciologiche 2021-2022. <https://www.glaciologia.it/i-ghiacciai-italiani/le-campagne-glaciologiche/>.

Kraus, K., s.d. *Fotogrammetria*. s.l.:s.n.

Macelloni, M. M., Cina, A. & Tonolo, F. G., 2021. Drone, aerial and satellite photogrammetry for 4D glacier survey and monitoring.

Macelloni, M. M., Cina, A., Tonolo, F. G. & Morra di Cella, U., 2024. Assessment of the Vertical Accuracy of Satellite-Based Glacier Monitoring. The Rutor Glacier in Italy.

Macelloni, M. M. et al., 2022. Multi-platform, Multi-scale and Multi-temporal 4D Glacier Monitoring. The Rutor Glacier Case Study.

Manzino, A. M., s.d. *Quaderni di topografia, volume 1: Geodesia, cartografia e trattamento delle misure..* s.l.:s.n.

Mazzoglio, P., 2025. Corso di prevenzione e protezione dai rischi climatici.

Montagna sicura & Regione Autonoma della Valle d'Aosta, s.d. Laghi Glaciali.

Morra di Cella , U. & Grosso, F., 2023. Rilievi glaciologici in Valle d'Aosta – anno 2023.

NASA, s.d. Scientific visualisation studio (<https://svs.gsfc.nasa.gov/5211/>).

Orombelli, G., 2005. The Rutor glacier (Aosta Valley) during the Little Ice Age.

UniMi, s.d. I ghiacciai della valle d'Aosta. <https://sites.unimi.it/glaciol/wp-content/uploads/2019/02/4-valle-daosta.pdf>.

Velikou, K., Lazoglou, G., Tolika, K. & Anagnostopoulou, C., 2022. Reliability of the ERA5 in Replicating Mean and Extreme Temperatures across Europe.

Villa, F., De Amicis, M. & Maggi, V., 2007. Gis analysis of Rutor Glacier (Aosta Valley, Italy) volume and terminus variations.

Villa, F. et al., 2007. Volume decrease of Rutor Glacier (western italian alps) since little ice age: a quantitative approach combining GPR, GPS, cartography.

WGMS, s.d. <https://wgms.ch/>.