

Le NEVI di NY-ÅLESUND BRØGGERHALVØYA ISOLE SVALBARD

Mauro Valt
ARPAV-DRST-SNV
Centro Valanghe di Arabba, Arabba
mauro.valt@arpa.veneto.it

Rosamaria Salvatori
CNR, Istituto sull'Inquinamento
Atmosferico, Roma
salvatori@iia.cnr.it

Nel periodo 1998-2015 sono stati effettuati oltre 190 rilievi stratigrafici del manto nevoso nell'area Ny-Ålesund (Brøggerhalvøya - Isole Svalbard) nell'ambito delle attività di ricerca del CNR presso la base scientifica di Ny-Ålesund – Dirigibile Italia. I rilievi sono stati effettuati ed archiviati secondo gli standard internazionali. L'analisi di oltre 1600 strati di neve ha permesso di delineare, per la zona artica alcune caratteristiche cristallografiche, dei grani: forme prevalenti, dimensioni medie, durezza e densità. I primi risultati evidenziano, per le nevi della Brøggerhalvøya, la prevalenza di cristalli sfaccettati FC, brina di profondità DH e di forme di transizione RGxf e FCxr. Inoltre sono stati osservati molti grani arrotondati RG dovuti all'azione del vento. La densità media della neve stagionale, determinata per la fine della stagione di accumulo, è di $311 \pm 86 \text{ kg m}^{-3}$, della neve pluriennale di $385 \pm 60 \text{ kg m}^{-3}$, per un valore medio generale di $346 \pm 45 \text{ kg m}^{-3}$. La copertura nevosa nell'area ha una durata, lungo la costa, di 7-8 mesi e con spessori generalmente inferiore ai 100 cm. La sequenza stratigrafica evidenzia la presenza di strati basali FC e DH e di sottili strati sovrastanti di IC e MF, che assieme alle caratteristiche generali del manto nevoso (durata e spessore) e alle caratteristiche meteorologiche dell'area, confermano la classificazione climatica in "High Arctic maritime snow climate" per le nevi occidentali delle isole Svalbard.



INTRODUZIONE

Nelle regioni artiche e subartiche i processi nivoglaciali sono attivi durante tutto l'anno e hanno un significativo impatto sull'ambiente.

Nel sistema nivoglaciale il manto nevoso e il ghiaccio sono gli elementi ambientali principali: il rilievo (altitudine, esposizione) e il clima ne determinano l'evoluzione regionale.

Alcune caratteristiche di questo sistema alle alte latitudini in climi marittimi delle isole Svalbard-Spitsbergen e dei Polar Urals, sono stati oggetto di studio già agli inizi del 1990 (Il'yina, 1991).

Gli effetti dell'accumulo di neve nelle isole Svalbard, in relazione alla topografia locale, sono stati discussi da Winther et al. (1998) e da Farnsworth (2013) mentre la variazione regionale dell'accumulo della neve, con le differenze sia nei gradienti latitudinali (S-N) sia longitudinali (E-W), relativamente al periodo 1997-1999, sono stati discussi da Sand et al. (2003).

Alcune dinamiche del manto nevoso stagionale in Artico sono state esposte anche da Bruland (2002) con la sperimentazione di modelli di simulazione della fusione del manto nevoso e della redistribuzione della neve ad opera del vento nell'area di Ny-Ålesund. Altri studi riguardano l'accumulo di neve lungo alcuni ghiacciai delle isole Svalbard per la determinazione del bilancio di massa e della sua variazione (es. Grabiec et al., 2006, Kohler 2007, Nuth et al. 2013). In queste campagne di misura sono stati effettuati profili del manto nevoso in diverse stagioni e in aree circoscritte (Moller et al. 2011).

Per quanto riguarda il ruolo del manto nevoso sui ghiacciai, Erath et al. (2005) hanno comparato 3 diversi modelli del manto nevoso (*Snowpack*, *SNtherm* e *Somars*) per simulare il ghiaccio sovrainposto lungo la linea di equilibrio del ghiacciaio Kongsvegen.

Moller et al. (2011) hanno illustrato le caratteristiche del manto nevoso nel Vestfonna e nel De Geerfonna (Nordauslandet, Svalbard) mediante la realizzazione di 22 profili del manto nevoso. L'analisi del manto nevoso ha riguardato la densità e

la durezza degli strati, l'evoluzione annuale del manto nevoso, la distribuzione spaziale, l'accumulo e i gradienti di *Snow Water Equivalent* (SWE) nelle due aree.

Leszkiewicz e Pulina (1999) hanno invece studiato le condizioni meteorologiche influenzanti la formazione del manto nevoso a Hornsund (*Polish Scientific Polar Station* 77°00'N, 15°33'E) e l'evoluzione del manto nevoso nella parte meridionale delle Svalbard. Per l'area di Hornsund sono stati presentati i gradienti verticali di precipitazione annuali e stagionali (inverno-estate), le diverse fasi della precipitazione nevosa durante la stagione invernale e alcuni profili stratigrafici del manto nevoso.

Anche Glowacki e Pulina (2000), negli studi sulle proprietà chimiche del manto nevoso, hanno investigato i profili stratigrafici delle Svalbard nei siti di Lomonosovfonna-Olav V Land (78°19'N, 17°30'E), Amundsenisen-Wedel Jarlsberg Land (77°15'N, 15°39'E), Kongsvegen-Kongsfjorden (78°48'N, 13°05'E), Fridjovbreen-Nordenskiold Land (77°52'N, 14°21'E), Hans Glacier in Hornsunf Fjord (77°05'N, 15°37'E), analizzando le precipitazioni delle stazioni di Barentsberg, Hornsund e Ny-Ålesund. Eckerstorfer & Christiansen (2011, 2012), a partire dall'analisi dei profili del manto nevoso, hanno definito il clima delle Svalbard centrali come 'High Arctic maritime snow climate' con presenza di un manto nevoso sottile, ma con una alta variabilità spaziale, freddo (-20 °C) e duro per gran parte dell'inverno.

Da tutti questi lavori se ne deduce che le caratteristiche stratigrafiche del manto nevoso sono il risultato di una complessa interazione di processi atmosferici e superficiali. Queste interazioni determinano non solo la quantità di acqua immobilizzata come neve ma anche le condizioni del manto nevoso (grani, densità, etc.) e la sua evoluzione (Callaghan et al. 2011). È stato inoltre sottolineato da vari autori come i fattori che influenzano maggiormente l'andamento stagionale del manto nevoso nella regione artica delle isole Svalbard, oltre alle basse temperature, al vento e alle forti variazioni stagionali di irraggiamento, siano:

- la corrente calda dell'Atlantico nord, che penetra nel mare di Barents da sud-ovest;
- la circolazione delle basse pressioni da sud-ovest che trasporta aria calda e umida in Artico.

Ne deriva che, considerando le Svalbard nel loro complesso, la temperatura media annuale (-3,9 °C a Isfjord Radio e -6,4 °C a Ny-Ålesund) è circa 6-7 °C più alta delle zone della Groenlandia alle stesse latitudini.

Questi elementi (temperature miti e aria tiepida e umida) regolano il regime delle precipitazioni (Forland and Hanssen-Baur, 2003) che da settembre a maggio sono prevalentemente di tipo nevoso anche se non sono inusuali piogge durante la stagione invernale che caratterizzano la struttura del manto nevoso, come evidenziato anche da Eckerstorfer & Christiansen (2012). La media annuale delle precipitazioni è di circa 400 mm totali lungo la costa occidentale (385 mm Ny-Ålesund) e decresce a 200-300 mm verso l'interno delle isole (190 mm Longyearbyen) (Sand et al., 2003); in ogni caso le precipitazioni sono comunque mediamente maggiori delle altre zone dell'Artico alle stesse latitudini (Steffensen, 1982).

Alcuni profili effettuati a Brøggerhalvøya, nelle stagioni primaverili 1997-1998, sono stati analizzati da diversi autori (Winther et al. 1997, Casacchia et al. 2001 Gerland 1999 a,b) e messi in correlazione alla formazione di ghiaccio marino (Gerland et al. 1999a) e al permafrost (Gerland et al. 1999b); in quest'ultimo caso si è anche visto come spessore e tipologia di neve al suolo svolgano una funzione vitale nell'evoluzione del biotopo nell'ambiente di tundra artica.

Nell'area della Brøggerhalvøya le caratteristiche della struttura verticale del manto nevoso stagionale sono pertanto di notevole importanza per comprendere i meccanismi che regolano la sua evoluzione in un ambiente lungo la costa lambita dalla corrente del golfo ma situata in ambiente di Alto Artico. Questa tipologia climatica è difficilmente rinvenibile in altre aree oltre il Circolo polare artico.

OBIETTIVO DEL LAVORO

Nel 1997 il Consiglio Nazionale delle Ricerche italiano (CNR) ha iniziato la sua attività di ricerca a Ny-Ålesund (Svalbard) aprendo la base scientifica *Dirigibile Italia*. Numerose sono le ricerche scientifiche svolte fino ad oggi (<http://www.polarnet.cnr.it/content/view/162/58/lang,it/>) e che hanno interessato anche l'interazione del manto nevoso con l'atmosfera, il suolo e l'ambiente artico in generale.

In particolare dal 1998 al 2015 sono stati effettuati oltre 190 profili del manto nevoso nella zona di Brøggerhalvøya seguendo gli standard internazionali (Fierz et al. 2009).

Questi profili costituiscono un prezioso set di dati sulle caratteristiche della neve nella regione artica.

Pertanto, in considerazione dell'importanza del manto nevoso nel sistema nivoglaciale artico e regionale delle isole Svalbard, con il presente lavoro si vogliono presentare le caratteristiche della neve nella regione costiera occidentale della Brøggerhalvøya (Ny-Ålesund).

AREA DELLA RICERCA

L'area della ricerca è localizzata nei dintorni di Ny-Ålesund, lungo la Brøggerhalvøya (penisola di Brøgger)-(Oscar II Land) nella parte nord-orientale dell'arcipelago delle isole Svalbard (74-81°N, 10-35°E, superficie di 63,000 Km²)-(Fig. 1).

Ny-Ålesund, che si affaccia lungo il Kongsfjorden, è situata a 78°55'N, 11°56'E, sulla costa occidentale di Spitsbergen, l'isola più grande dell'arcipelago delle Svalbard. L'insediamento è la sede permanente di circa 35 persone che servono la stazione di ricerca tutto l'anno (www.kingsbay.no).

La Brøggerhalvøya, disposta lungo un asse SE-NW è delimitata dal Kongsfjorden e dalla Prins Karls Forland ed è caratterizzata da diversi ghiacciai vallivi (Austre - Midtre - Vestre Lovénbreen, Austre Brøggerbreen, etc.); la cima più elevata è il Geelmuydentoppen 1017 m s.l.m..

Alcuni rilievi sono stati effettuati anche in aree limitrofe lungo i ghiacciai Kongsbre-



Fig. 1 - Le isole Svalbard.

en, Comfortlessbreen e Høltedahlfonna (1125 m s.l.m.)

METODO

I profili del manto nevoso sono stati realizzati tutti nei mesi di aprile e maggio nel periodo 1998-2015. I profili sono stati effettuati in aree indisturbate dal passaggio delle motoslitte (profili itineranti) o in campi neve delimitati nel caso di ricerche che richiedevano la ripetizione dei profili a pochi giorni di distanza.

Per ogni profilo stratigrafico sono stati acquisiti i dati relativi ad ogni strato individuato: spessore, durezza, densità, tipo e dimensione dei grani/cristalli e temperatura secondo gli standard internazionali (Fierz et al. 2009). La stratificazione del manto nevoso è stata individuata mediante l'osservazione della variazione della durezza degli strati e l'osservazione delle forme dei grani. In particolare la durezza degli strati del manto nevoso (R) è stata determinata usando il test della mano e in singoli casi è stata utilizzata anche la sonda battage (Cagnati, 2003).

La densità del manto nevoso (ϕ) è stata determinata per carotaggio orizzontale di ogni singolo strato, usando un tubo carotatore in metallo da 0,125 l e dal diametro di 25 mm per poter misurare anche gli strati più sottili.

La tipologia di grani di ogni strato (FF) è stata identificata mediante l'osservazione con una lente di ingrandimento su una piastrina cristallografica, distinguendo fra la classe principale e la sottoclasse evolutiva dei grani (Fierz et al. 2009, www.snowcrystals.it); per ogni tipologia è stato determinato anche il valore della

dimensione media (EE)-(Fierz et al. 2009) mediante l'osservazione diretta con lenti di ingrandimento. La temperatura del manto nevoso è stata misurata ogni 10 cm di spessore di neve utilizzando un termometro digitale.

Tutti i dati dei profili del manto nevoso sono stati archiviati con il software YetiNik (Valt et al. 2012) secondo gli standard internazionali (Fierz et al. 2009).

Il software, multilingua, è utilizzato dai servizi valanghe italiani afferenti all'AlNEVA per l'inserimento, verifica, elaborazione, archiviazione e visualizzazione dei dati dei profili del manto nevoso.

I profili realizzati nelle prime spedizioni scientifiche e archiviati con altri software sono stati importati.

DATA SET

Per analizzare l'evoluzione stagionale del manto nevoso nell'area di studio sono stati utilizzati i dati di altezza neve (HS) misurati presso la stazione meteorologica di Ny-Ålesund (99910) (Latitudine: 78.923 N Longitudine: 11.9333 E, Quota: 8 m, Stazione nr.: 99910 WMO nr. 01007, operativa dal 1974-07-26) ed estratti dalla banca dati: <http://eklima.met.no>

Per lo studio delle caratteristiche del manto nevoso, della cristallografia e delle caratteristiche fisico meccaniche del manto nevoso, sono stati utilizzati i dati dei profili del manto nevoso realizzati fra il 1998 e il 2015 lungo la penisola e i ghiacciai adiacenti, attualmente archiviati sui server del ARPA-Centro Valanghe di Arabba (Valt et al., 2012) e del CNR-IIA, su quest'ultimo corredati con le firme spettrali della superficie (tlr.ii.cnr.it/Sispec.htm).

I profili del manto nevoso sono stati eseguiti in 9 diverse campagne di misura (Fig. 2).

In alcune campagne sono stati eseguiti profili nello stesso sito ma breve distanza di tempo (1-3 giorni) per studiare l'evoluzione del manto nevoso con i parametri meteorologici locali. Questi rilievi sono 3 nel 2001 (Ny-Ålesund), 8 nel 2010 (Ny-Ålesund - Gruvebadet), 55 nel 2011 (Ny-Ålesund - Gruvebadet, Ny-Ålesund - Climate Change Tower e Ny-Ålesund - Brøggerhalvøya) e 10 nel 2013 (Ny-Ålesund - Gruvebadet).

In altri 11 casi sono stati ripetuti 1-3 profili nello stesso sito lungo la penisola.

Nel caso di più profili ravvicinati nel tempo o effettuati nello stesso luogo, si è scelto di selezionare il profilo più rappresentativo della situazione locale.

Sulla base di questi parametri, è stato realizzato un data base di 100 profili del

manto nevoso eseguiti lungo la costa della Brøggerhalvøya, i ghiacciai Austre Brøggerbrenn, Midtre Lovénbreen, Austre Lovénbreen e Kongswegen e singoli rilievi nei siti più distanti di Comfortlessbreen e Holtedahlfonna, nelle diverse spedizioni scientifiche succedutesi nei diversi anni.

Dal punto di vista altimetrico, 34 rilievi sono ubicati nelle fasce altimetriche 0 (pack) - 100 m s.l.m., 33 nelle fasce altimetriche 101 - 400 m s.l.m. e i rimanenti 33 fra i 401 m e i 1125 m s.l.m..

Il sito di misura più elevato è Holtedahlfonna (1125 m s.l.m.).

Lo spessore massimo di neve indagato è stato di 295 cm nel sito di Holtedahlfonna (1125 m s.l.m.) e il valore medio di altezza dei profili del manto nevoso di 96 cm di neve.

I profili di sola neve stagionale presenti nel data base sono 44 con un'altezza (HS) media di 55 cm, mentre i rimanenti 56 profili con neve stagionale e pluriennale hanno uno spessore (HS) medio di 130 cm, dei quali 50 cm di neve stagionale e 80 cm di neve pluriennale.

ANALISI DEI RISULTATI

Nei 100 profili selezionati per questo lavoro, sono presenti ben 1602 strati del manto nevoso, le cui caratteristiche sono

state analizzate nel dettaglio e i risultati riportati di seguito in funzione dei singoli parametri analizzati.

Densità del manto nevoso (ρ)

La densità media del manto nevoso per la Brøggerhalvøya è stata determinata utilizzando il valore di densità medio di ogni rilievo del manto nevoso. La media dei valori dei 100 profili del data base ha indicato per la Brøggerhalvøya, un valore di $346 \pm 45 \text{ kg m}^{-3}$, inferiore alle nevi di ghiacciaio o annuali individuate nel Vestfonna e pari a $388 \pm 45 \text{ kg m}^{-3}$ (Moller et al., 2011) o determinato genericamente per la neve della Spitsbergen di 375 kg m^{-3} da Sand et al. (2003).

Questo valore, inferiore a quanto proposto da Moller e Sand, è dovuto all'elevata presenza di rilievi con neve stagionale nel data set. Per poter comprendere i valori di densità della neve stagionale e dalla neve pluriennale della Brøggerhalvøya, si è provveduto ad individuare gli strati dell'ultima stagione e quelli della neve pluriennale. Questa separazione è stata fatta in base all'esperienza dell'osservatore in campo che ha annotato nei profili questa differenza. Ad esempio, nei profili a bassa quota, lo strato di separazione corrisponde ad una crosta da fusione e rigelo (MFcr) o ad una massa di ghiaccio (IF) molto compatta dovute alla fusione estiva. I valori così calcolati hanno dato per la neve stagionale una densità di $311 \pm 86 \text{ kg m}^{-3}$ mentre per le nevi annuali di $385 \pm 60 \text{ kg m}^{-3}$, valore questo ultimo come indicato in bibliografia.

Per quanto riguarda le diverse fasce altimetriche (Fig. 3) non ci sono sostanziali differenze dei valori di densità del manto nevoso, eccetto per le nevi stagionali nella fascia 101-400 m s.l.m. risultate mediamente a densità inferiore.

Tipologia di grani (F)

Nei 1602 strati del manto nevoso analizzati le forme dei grani prevalenti sono risultate i cristalli sfaccettati (FC) con il 22,4% (Fig. 4). Queste forme sono state osservate sia negli strati superficiali del manto nevoso a bassa quota che in quota, spesso rico-

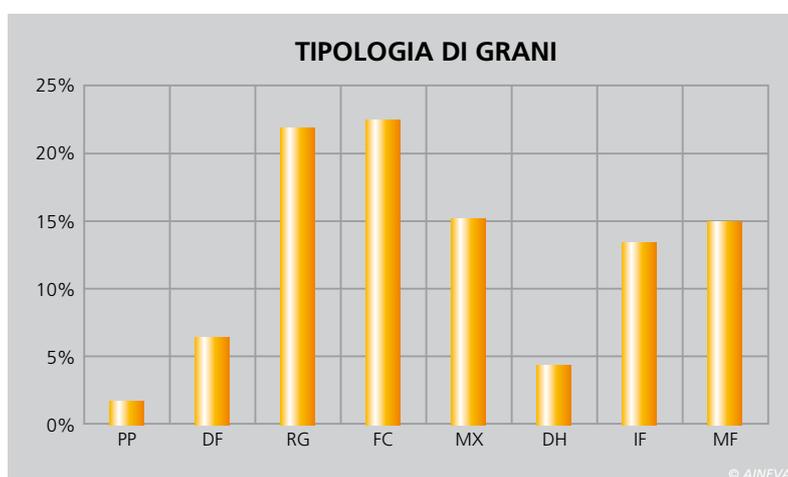
Fig. 2 - Rilievi del manto nevoso eseguiti nelle diverse spedizioni scientifiche.

Primavera	Numero rilievi
1998	6
2000	8
2001	21
2003	14
2010	14
2011	64
2012	21
2013	41
2015	1

Fig. 3 - Densità media del manto nevoso per fasce altitudinali con la differenziazione fra la neve stagionale e quella pluriennale.

Range altitudine	media	DV.ST	media	DV.ST	media	DV.ST
	kgm ⁻³		Neve Pluriennale kgm ⁻³		Neve Stagionale kgm ⁻³	
0-100 m s.l.m.	343	58	= =		315	85
101-400 m s.l.m.	352	32	386	67	300	82
> 400 m s.l.m.	344	35	384	55	324	76
TOTALE	346	45	385	60	311	60

Fig. 4 - Percentuale della tipologia di grani presenti negli strati utilizzati nei 100 profili campione del manto nevoso.



perle da strati di grani arrotondati (RG) o al di sotto di croste o di masse di ghiaccio (IF). Le forme RG sono state osservate nel 21,8% dei casi, sia come neve ventata che come prodotto del metamorfismo da basso gradiente.

Le forme miste, grani arrotondati con poche facce (RGxf) e cristalli sfaccettati con recente arrotondamento delle facce (FCxr) sono state osservate nel 15% degli strati, sia vicino alla superficie che in profondità. Eckerstorfer & Christiansen (2011), nell'area di Longyearbyen e nelle due stagioni invernali 2007-2008 e 2008-2009, avevano rilevato una dominanza di queste tipologie di forme nella struttura del manto nevoso con ben il 23% delle forme.

La brina di profondità (DH) è presente nella percentuale del 4,3% degli strati del database e la brina di superficie (SH) in pochi singoli casi.

La neve di precipitazione (PP) e le particelle decomposte e frammentate (DF) sono presenti solo nella quantità dell'8% degli strati quindi un po' meno rispetto al 17% delle osservazioni di Eckerstorfer & Christiansen.

Questo può essere spiegato col fatto che le osservazioni nell'area della Brøggerhalvøya sono state effettuate nella tarda primavera e all'inizio della stagione della fusione e non durante tutta la stagione invernale come Eckerstorfer & Christiansen (2011).

Infatti, sono molti gli strati formati da forme e croste da fusione (MF) e da masse di ghiaccio (IF) (il 14,9% e il 13,4%, rispetto al 9% e al 12% delle osservazioni di Eckerstorfer & Christiansen (2011) tipiche sia di eventi di pioggia sia di aumenti della temperatura con processi da fusione.

La densità delle varie forme dei grani varia dai valori medi di $121 \pm 37 \text{ kg m}^{-3}$ delle forme PP ai $354 \pm 52 \text{ kg m}^{-3}$ delle forme miste il cui maggior contributo è dato dalle forme RGxf ($354 \pm 52 \text{ kg m}^{-3}$) rispetto alle forme FCxr ($335 \pm 31 \text{ kg m}^{-3}$).

Le forme FC hanno una densità media di ($330 \pm 52 \text{ kg m}^{-3}$) (Fig. 5).

Dimensioni dei grani (E)

Le dimensioni medie dei cristalli (Fierz et

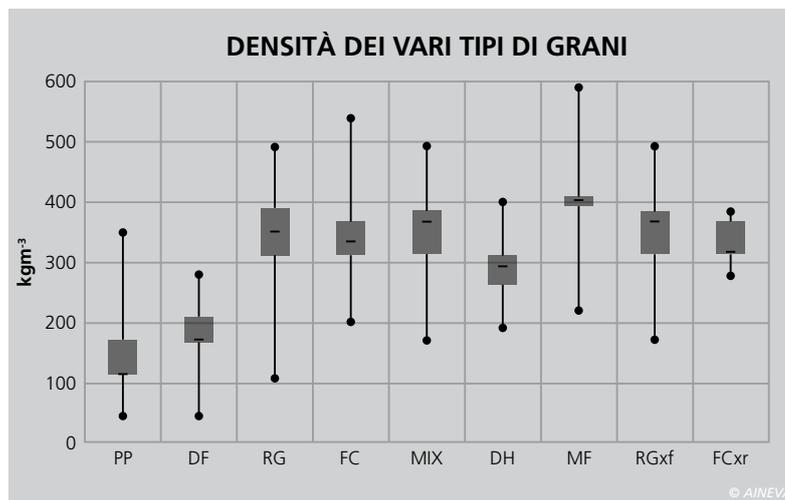


Fig. 5 - Densità della neve in relazione alla forma dei cristalli degli strati (1604 strati di neve).

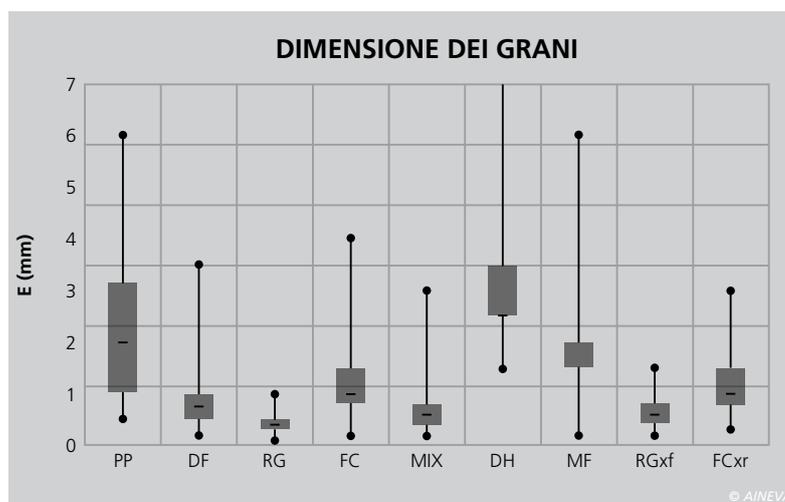


Fig. 6 - Dimensione dei grani espresso in mm.

al. 2009) sono state determinate mediante l'osservazione diretta con lente di ingrandimento sulla piastrina cristallografica.

La maggior parte dei grani osservati nel manto nevoso hanno dimensioni medie inferiori ad 1 mm. I grani arrotondati (RG), hanno dimensioni medie di $E=0,4 \text{ mm}$, le forme miste (RGxf e FCxr) leggermente superiori ($E=0,6 \text{ mm}$) e i cristalli sfaccettati (FC) di 1 mm (Fig. 6). Le forme di brina di profondità (DH) sono state osservate piccole ma anche ben sviluppate con diametri prossimi ai 10 mm . Queste forme (RG, FC, DH, RGx e FCxr) rappresentano il 65% degli strati del manto nevoso osservati. La dimensione media delle particelle di precipitazione (PP) è di $E=2,0 \text{ mm}$ e delle particelle di precipitazione decomposte e frammentate (DF) di $E=0,8 \text{ mm}$, conseguenza dell'evoluzione delle PP per basso gradiente di temperatura o per l'azione del vento.

Le forme di neve umida (MF) hanno dimensioni medie dei policristalli di $E=2,0 \text{ mm}$.

Durezza della neve (R)

La durezza degli strati del manto nevoso è stata definita con il test della mano (Fierz et al., 2009). La durezza più frequentemente osservata negli strati di neve della Brøggerhalvøya è stata dell'indice "medio" e "dura" (Fig. 7) che corrisponde ad una neve con densità di $333 \pm 62 \text{ kg m}^{-3}$ e di $362 \pm 59 \text{ kg m}^{-3}$.

La durezza "media" è stata riscontrata soprattutto negli strati formati da cristalli FC e RG e da grani RG e MIX (RGxf and FCxr). Gli strati formati da grani MIX (RGxf e FCxr) hanno evidenziato l'indice di durezza superiore "dura" con una densità media di $362 \pm 59 \text{ kg m}^{-3}$.

La durezza "dura" è stata riscontrata anche in molti strati formati da grani RG. Le durezze più elevate "molto dura" e "ghiaccio" sono state osservate negli strati formati da MF e IF. Strati di durezza "soffice" sono stati rinvenuti frequentemente nella neve superficiale, formati da cristalli DF e PP ma anche in molti strati

Fig. 7 - Durezza del manto nevoso e tipi di grano.

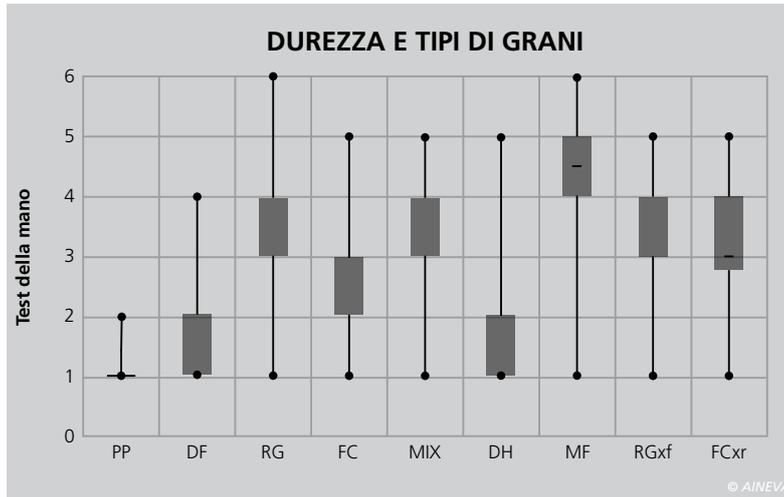
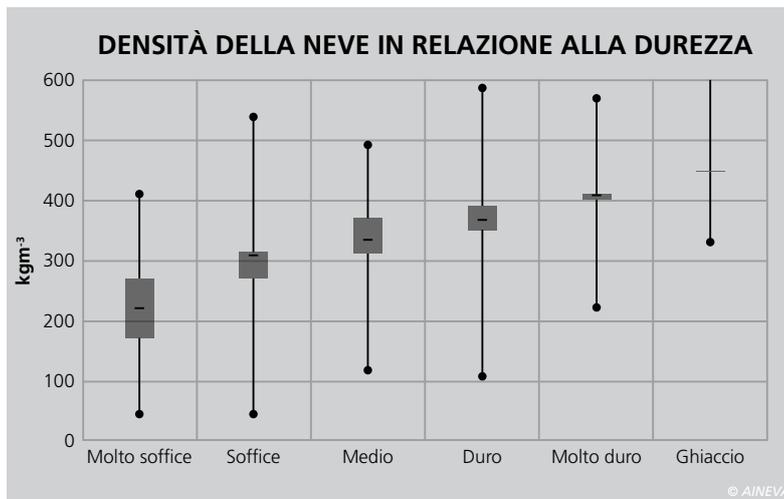


Fig. 8 - Densità della neve in relazione alla sua durezza.



interni di FC e DH. La durezza "soffice" è stata individuata più frequentemente con strati di neve di PP ma anche di DF e DH. (Figure 9). In generale la maggior frequenza di strati con indici di durezza "media" e "dura" riscontrata nelle nevi della Brøggerhalvøya è stata riscontrata anche da Eckerstorfer e Christiansen (2011) nelle nevi stagionali di Longyearbyen con una densità comparabile ai valori di 380 kg m^{-3} delle isole Svalbard indicati da Sand et al. (2003).

STRUTTURA DEL MANTO NEVOSO E DISCUSSIONE

Per la stazione di Ny-Ålesund (WMO n. 99910) sono disponibili i dati di altezza della neve al suolo (HS) (<http://eklima.met.no>) dal 2009 al 2015 (Fig. 8). I grafici lineari dell'andamento da ottobre a giugno evidenziano che da ottobre alla metà circa di gennaio, lo spessore della neve al suolo è generalmente inferiore ai 20 cm

e frequentemente con un andamento irregolare come nelle stagioni 2010, 2012, 2013 e 2015. La riduzione degli spessori in queste annate o la temporanea scomparsa della neve è dovuta al vento, a bruschi innalzamenti della temperatura con la fusione della neve e/o a piogge invernali. Sulla base dei dati a disposizione, si può affermare che il manto nevoso si forma in modo regolare dalla metà di gennaio in poi per raggiungere il suo massimo spessore (HS_{max}), dai 30 agli 80 cm, nel mese di aprile, con la stagione 2014 molto nevosa e un massimo di 131 cm di HS_{max} . La stagione della fusione del manto nevoso stagionale inizia generalmente nella seconda metà del mese di maggio per concludersi a giugno inoltrato. La durata media della neve al suolo nelle 6 stagioni, da ottobre a giugno, è quindi di 223 giorni (7-8 mesi).

I rilievi della stratigrafia del manto nevoso presentati in questo lavoro e disponibili per il sito di Ny-Ålesund, sono relativi al

periodo precedente all'inizio della fusione del manto nevoso e pertanto la struttura del manto nevoso è la risposta dell'accumulo stagionale e dell'andamento climatico della stagione invernale e dell'area nel suo insieme.

Gli anni in cui si hanno a disposizione i profili del manto nevoso sono: 1998, 2000, 2001, 2003, 2010, 2011 e 2015.

L'analisi della disposizione degli strati del manto nevoso e la loro successione dal terreno verso l'alto ha messo in evidenza alcune caratteristiche ricorrenti in quasi tutti i profili eseguiti (Fig. 10).

In generale il manto nevoso alla fine di aprile-inizio di maggio, presenta alla base a contatto con il terreno, strati di cristalli sfaccettati (FC) e brina di profondità (DH), alternati a strati di ghiaccio (IF) o forme fuse (MF) e in superficie di neve ventata formati da grani arrotondati (RG).

Gli strati di cristalli sfaccettati (FC) e di brina di profondità (DH) si formano nel periodo in cui il manto nevoso ha spessori ridotti e il gradiente di temperatura all'interno della neve è significativo e favorisce la crescita cinetica dei grani.

In genere questa neve è l'accumulo dei mesi da novembre a gennaio; in mancanza di questo strato la base del manto nevoso è formata da strati duri e compatti di forme fuse (MF) o formazione di ghiaccio (IF).

Sopra di questi strati di FC e DH, sono stati osservati strati sottili ($L=1-2 \text{ cm}$) di formazione di ghiaccio (IF) conseguenti a delle piogge invernali che hanno umidificato lo strato di neve superficiale (con la formazione di croste da pioggia) o a temporanei e bruschi innalzamenti della temperatura dell'aria con valori positivi. Queste croste da pioggia (IFrc) e croste da fusione e rigelo (MFcr) formano un'ulteriore barriera al flusso di vapore interno del manto nevoso favorendo lo sviluppo di strati intermedi di FC, spesso molto grandi ($E>1,5 \text{ mm}$).

In superficie sono frequenti strati duri formati da grani molto piccoli grani arrotondati (RG) dovuti all'intensa azione del vento e più raramente a processi di basso gradiente.

CLASSIFICAZIONE CLIMATICA DELLA NEVE STAGIONALE DELLA BRØGGERHALVØYA

Strum et al. (1995) hanno proposto una classificazione climatica della neve stagionale al suolo sulla base di alcune caratteristiche del manto nevoso: la presenza di strati di brina di profondità (DH), la % di strati di ghiaccio nel profilo del manto nevoso, lo spessore medio, la temperatura della neve, la durata in mesi della copertura nevosa.

Eckerstorfer e Christiansen (2011), sulla base delle indicazioni per la classificazione climatica di Strum et al. (1995) e dei rilievi effettuati nell'area di Longyearbyen nelle stagioni invernali 2007-2008 e 2008-2009, hanno proposto un'evoluzione e modificazione della classificazione climatica "tundra" dello stesso Strum et al. (1995).

La classificazione in "tundra" è caratterizzata dalla presenza nel manto nevoso di strati di brina di profondità (DH), alternati a formazione di ghiaccio dovute a temporanei riscaldamenti o piogge invernali, spessori ridotti del manto nevoso e durata della copertura nevosa di 6-8 settimane. Eckerstorfer e Christiansen (2011), analizzando i profili del manto nevoso, la forma dei grani, la loro dimensione, la durezza della neve e la durata della copertura nevosa delle nevi intorno a Longyearbyen, hanno indicato la classificazione climatica "High Arctic maritime snow" per le nevi delle Svalbard. Questa nuova tipologia di clima è caratterizzata da un manto nevoso freddo e non molto spesso (HS=10-75 cm), con frequenti strati di brina di profondità (DH) e un significativo numero di strati di ghiaccio (IF) dovuti all'influenza del tempo meteorologico marittimo durante l'intera stagione della presenza della neve con una copertura nevosa che dura dai 7 ai 10 mesi all'anno.

Le caratteristiche riscontrate nei profili del manto nevoso lungo la Brøggerhalvøya e quindi nei dintorni di Ny-Ålesund, concordano con le osservazioni di Eckerstorfer e Christiansen (2011).

La struttura del manto nevoso osservata nelle diverse stagioni evidenzia la ricorrenza di strati DH e FC alternati a frequenti strati di IF/MF, spessori del manto nevoso inferiori ai 100 cm, una densità media fra i 340 e i 380 kg m⁻³ e una durata della

copertura nevosa dai 7 agli 8 mesi.

CONCLUSIONI

Con questo lavoro sono state presentate alcune caratteristiche fisiche dei grani e cristalli delle nevi della Brøggerhalvøya

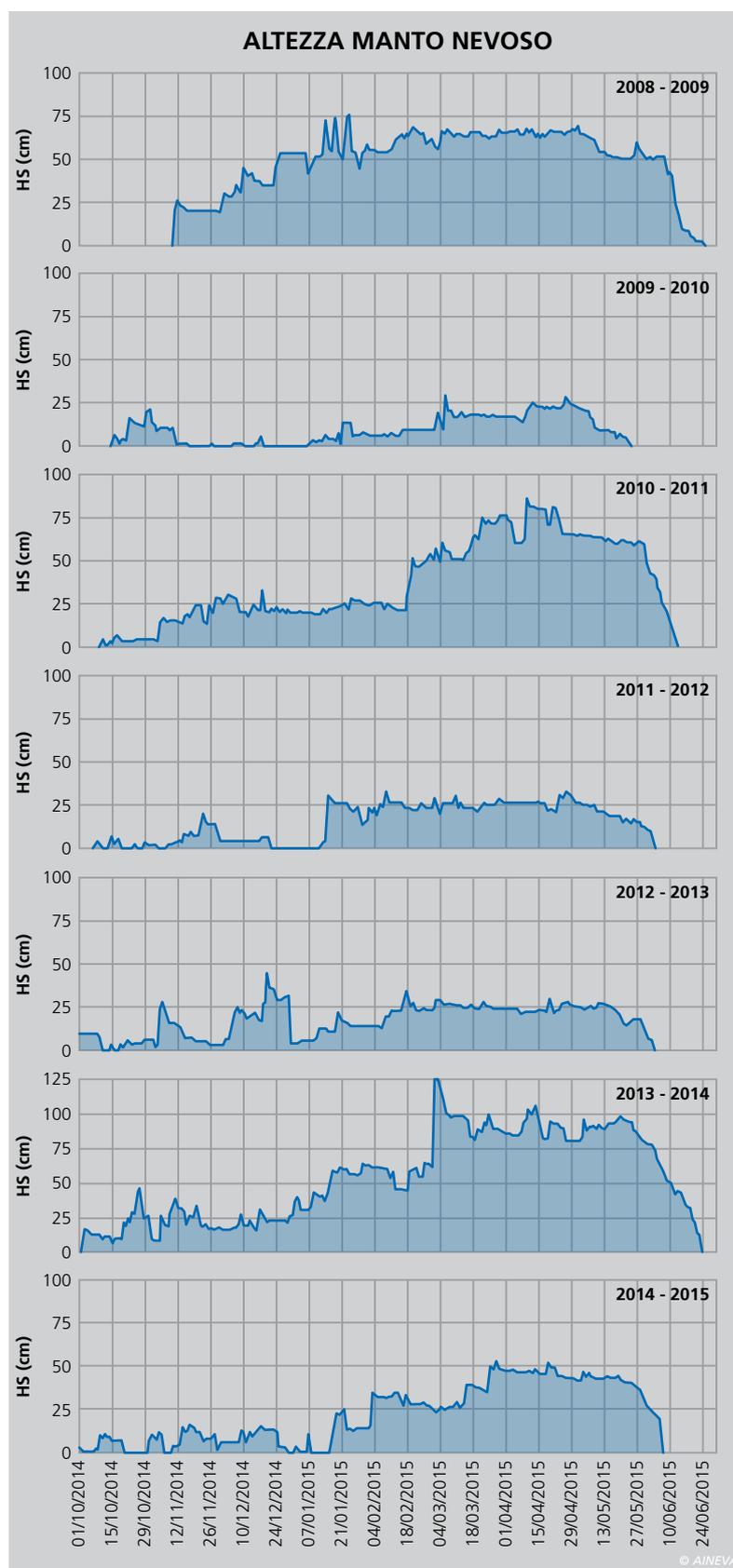
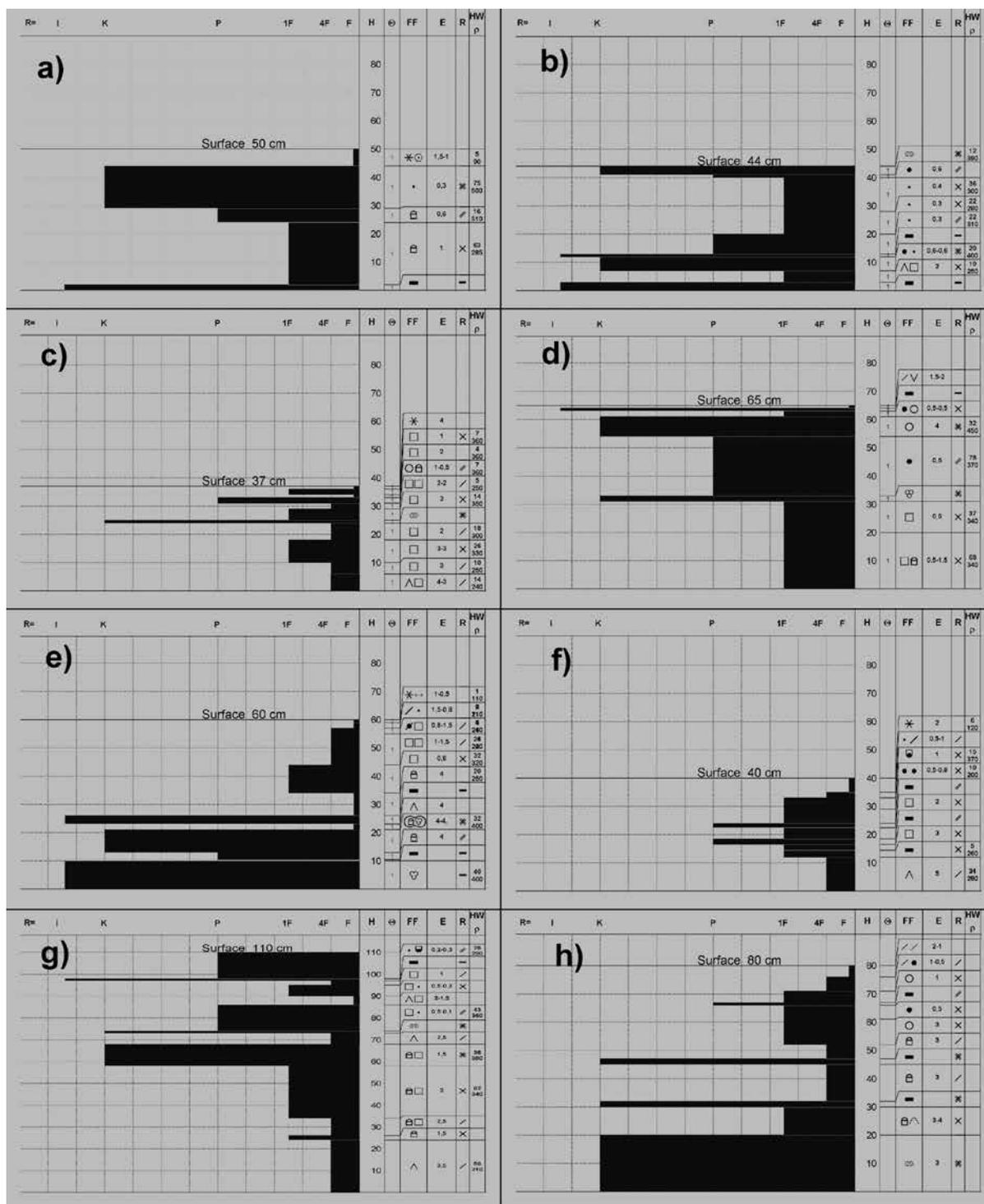


Fig. 9 - Altezza neve a Ny-Ålesund (99910) (Latitude: 78.923N Longitude: 11.9333E Elevation: 8 Station nr.: 99910 WMO nr.: 01007 Operational from: 1974-07-26) Data from <http://eklima.met.no>.

Fig. 10 - Profili del manto nevoso eseguiti a Ny-Ålesund nelle diverse spedizioni: a) 1998.04.24, osservatore A. Cagnati, b) 2000.05.03, R. Zasso, c) 2001.04.23, M. Valt, d) 2003.05.06, M. Valt, e) 2010.04.23, M. Valt, f) 2011.04.14, R. Salvatori - M. Valt, g) 2013.04.22, A. Spolaor - J. Gabrieli, h) 2015.05.20, R. Salvatori - M. Valt



derivati da un data set di 100 profili del manto nevoso realizzati in diverse spedizioni scientifiche nell'arco di 18 anni (1998-2015). Le caratteristiche della neve stagionale come durezza, forma e dimensione dei grani, densità per tipologia di strati della neve, potranno essere utili per comprendere l'evoluzione delle nevi stagionali delle isole Svalbard e per migliorare lo studio dei processi di controllo dei modelli di simulazione del manto nevoso per l'Alto Artico.

I valori di densità del manto nevoso individuati per l'area è di $346 \pm 45 \text{ kg m}^{-3}$ e l'analisi dei profili del manto nevoso ha permesso di evidenziare la netta differenza dei valori di densità fra le nevi pluriannuali ($385 \pm 60 \text{ kg m}^{-3}$) e le nevi stagionali di fine aprile ($311 \pm 86 \text{ kg m}^{-3}$), che hanno valori più bassi. Questo permetterà, per l'area delle Svalbard centrali e le aree sulla costa occidentale, di migliorare la stima dello SWE locale e il calcolo dei bilanci di massa dei ghiacciai situati lungo la costa

e ancora ricoperta di neve stagionale. Le caratteristiche strutturali del manto nevoso della Brøggerhalvøya hanno evidenziato la frequente presenza di strati formati da cristalli FC e DH alternati a MF o IF, dovute a piogge invernali e/o a bruschi e temporanei innalzamenti della temperatura conseguenti a flussi di aria mite. Queste caratteristiche del manto nevoso stagionale, assieme a bassi spessori e ad una durata della neve stagionale di circa 7-8 mesi, sono in accordo con la classifica-

zione climatica proposta da Eckerstorfer e Christiansen (2011) in "High Arctic maritime snow climate" anche per l'area di Brøggerhalvøya e di Ny-Ålesund, ubicata lungo la costa e più a nord di Longyearbyen.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato reso possibile dalla collaborazione di tante persone che in diverso modo hanno collaborato o partecipato alle spedizioni scientifiche presso

la base del CNR di Ny-Ålesund. Un particolare ringraziamento a Ruggero Casacchia, Anselmo Cagnati, Roberto Sparapani, Jacopo Gabrieli, Renato Zasso, Andrea Spolaor e alla guida artica Steano Poli.

Bibliografia

- Boike J., Roth K., Ippisch O. (2003). Seasonal snow cover on frozen ground: Energy balance calculations of a permafrost site near Ny-Ålesund, Spitsbergen, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 108, NO. D2, 8163, doi:10.1029/2001JD000939, 2003
- Bruland O., Sand K., Killingtveit A., (2001). Snow Distribution at a High Arctic Site at Svalbard. *Nordic Hydrology*, 32(1), 2001, 1-2
- Casacchia R., Lauta F., Salvatori R., Cagnati A., Valt M., Orbek J.B. (2001). Radiometric investigation on different snow covers in Svalbard, *Polar Research* 20(1), 13-22
- Cagnati A. (2003). Sistemi di Misura e metodi di osservazione nivometeorologici. AINEVA, Trento, 186 pp
- Callaghan et al. (2011). The Changing Face of Arctic Snow Cover: A Synthesis of Observed and Projected Changes, *AMBIO* (2011) 40:17-31 DOI 10.1007/s13280-011-0212-y
- Christiansen H. H., Humlum O., Eckerstorfer M. (2013). Central Svalbard 2000-2011 Meteorological Dynamics and Periglacial Landscape Response, *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol. 45, No. 1, 2013, pp. 6-18.
- Derksen C., Brown R., MacKay M. (2008). Mackenzie basin snow cover: Variability and trends from conventional data, satellite remote sensing, and Canadian regional climate model simulations. In *Cold region atmospheric and hydrologic studies, the Mackenzie GEWEX experience*, ed. M.K. Woo, 213-240. Berlin: Springer.
- Eckerstorfer M. (2012). Snow avalanches in central Svalbard: A field study of meteorological and topographical triggering factors and geomorphological significance. Ph.D. Thesis Longyearbyen, 2012. Arctic Geology Department, The University Centre in Svalbard, Norway
- Eckerstorfer M., Christiansen H.H. (2011a). Relating meteorological variables to the natural slab avalanche regime in High Arctic Svalbard. *Cold Regions Science and Technology* Volume 69, Issues 2-3, December 2011, Pages 184-193
- Eckerstorfer M., Christiansen H.H. (2011b). The "High Arctic Maritime Snow Climate" in Central Svalbard Arctic, Antarctic, and Alpine Research 43 (1), 11-21
- Erath S., Obleitner F., Gruell W. (2005). Comparative Simulations of Snow and superimposed ice at the Kongsvegen Glacier, Svalbard. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, 10029, 2005 SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-10029
- Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Greene E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A. (2009). The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. IHP-VII Technical Documents in Hydrology N°83, IACS Contribution N°1, UNESCO-IHP, Paris
- Forland E. J., Hanssen-Bauer (2003). Past and future climate variations in Norwegian Arctic: overview and novel analyses. *Polar Research* 22(2), 113-124
- Gerland S., Winther J.G., Orbaek J.B., Liston G.E., Oristland N., Blanco A., Ivanov B. (1999a). Physical and optical properties of snow covering Arctic tundra on Svalbard. *Hydrol. Process.* 13, 2331-2343
- Gerland S., Winther J.G., Orbaek J.B., Ivanov B. (1999b). Physical properties, spectral reflectance and thickness development of first year fast ice in Kongsfjorden, Svalbard. *Polar Research* 18(2), 275-282
- Glowacki P., Pulina M. (2000). The physico-chemical properties of the snow cover of Spitsbergen (Svalbard) based on investigations during the winter season 1990/1991. *Polish Polar Research*, no.21, 2, 65-88
- Grabiec M., Leszkiewicz J., Glowacki P., Jania J (2006). Distribution of snow accumulation on some glaciers of Spitsbergen. *Polish Polar Research*, Vol.27, no. 4, pp 309-326
- Hansen J.R., Hansson R, Norris S. (1996). The state of European Arctic Environment. EEA Environmental Monograph n.3, Norwegian Polar Institute
- Il'yina E.A.(1991). Characteristics of nival-glacial system at high latitudes in a marine climate. *Glaciers-Ocean-Atmosphere Interactions. Proceedings of International Symposium held at St. Petersburg, September 1990*, IAHS Publ. no. 208
- Kohler J. (2007). NP mass balance measurements of glaciers in Svalbard. www.miljo.npolar.no-(non c'è)
- Leszkiewicz J., Pulina M. (1999). Snowfall phases in analysis of snow cover in Hornsund, Spitsbergen. *Polish Polar Research*, no.20, 1, 3-24
- Moller M., Moller R., Beaudon E., Mattila O-P., Finkelnburg R., MBraun M., Grabiec M., Jonsell U., Luks B., Puczek D., Scherer D., Schneider C. (2011). Snowpack Characteristics of Vestfonna and De Geerfonna (Nordaustland, Svalbard), a spatiotemporal analysis based on multi year snow-pit data. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*. 2011. Sweden Society for Anthropology and Geography
- Mora C., Vieira G., Pina P., Lousada M., Christiansen H.H. (2015). Land cover classification using high resolution aerial photography in Adventdalen, Svalbard *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, doi:10.1111/geoa.12088
- Moreno R.M., Serrano Canadas E. (2013). Snow cover evolution in the High Arctic, Nordenskiöld Land (Spitsbergen, Svalbard). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles* 61 : 409-413
- Nuth C., Kohler J., König M., von Deschwanden A., Hagen J.O., Käbb A, Moholdt G., Pettersson (2013). Decadal changes from a multi-temporal glacier inventory of Svalbard, *The Cryosphere*, 7, 1603-1621, doi:10.5194/tc-7-1603-2013, 2013
- Sturm M., Holmgren J., Liston E.G. (1995). A Seasonal Snow Cover Classification System or Local to Global Applications. *J. Climate*, 8, 1261-1283. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<1261:ASSCCS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<1261:ASSCCS>2.0.CO;2)
- Sand K., Winther J-G., Marechal D., Bruland O., Melvold K. (2003). Regional Variations of Snow Accumulation on Spitsbergen, Svalbard, 1997-99. *Nordic Hydrology*, 34 (1/2), 2003, 17-32
- Sauter T, Moller M, Finkelnburg R, Grabiec M, Scherer D, and Schneider C (2013). Snowdrift modelling for the Vestfonna ice cap, north-eastern Svalbard. *The Cryosphere*, 7, 1287-1301, 2013, doi:10.5194/tc-7-1287-2013
- Steffensen E. (1982) The climate of Norwegian Arctic Station -Klima 5---3-44, Oslo, Norwegian Meteorological Institute
- Valt M., Monti F., Cianfarra P., Moro D. (2012). Physical properties of snow cover in Alps: insight from the Davos area (Switzerland) and Veneto-Friuli Venezia Giulia regions (Italy). *Geophysical Research Abstracts* Vol. 14, EGU2012-12471, 2012
- Valt M, Chiambretti I, Dellavedova P. (2012). YETI - a software to service the avalanche forecaster: Proceedings of Advances in Avalanche Forecasting - Section 2 New approaches and tools for avalanche forecasting, Podbanské, Slovakia, 22nd Oct. 2012, Eds. Richnavsky, J, Biskupic, M, and Kyzek, F, p. 38-43
- Winther J.G., Bruland O., Sand K.S, Killingtveit Å., Marechal D. (1998). Snow accumulation distribution on Spitsbergen, Svalbard, in 1997. *Polar research* Vol 17, No 2
- Winther J.G., Bruland O., Sand K., Greland S., Marechal D., Ivanov B., Glowacki P., Konig M. (2003). Snow research in Svalbard- an overview *Polar research* 22(2), 125-144