

## Sintesi della tesi di Laurea Magistrale di

Paolo Colosio

### *Enhanced resolution mapping of melting over the Greenland and Antarctica ice sheets (1979 - 2016) using passive microwave brightness temperatures*

Università degli Studi di Brescia, DICATAM, Laurea magistrale in Civil and Environmental Engineering

Relatore: Prof. Roberto Ranzi (Università degli Studi di Brescia)

Correlatore: Prof. Marco Tedesco (Columbia University)

Anno Accademico 2018/2019

#### **1) Introduzione**

Le calotte di ghiaccio di Groenlandia ed Antartide sono le due più grandi masse glacializzate presenti sul nostro pianeta. Il loro volume di ghiaccio, se completamente fuso, corrisponde ad un innalzamento del livello medio degli oceani di 7 m e 55 m, rispettivamente. Dai dati rilevati tramite la missione satellitare GRACE si può stimare che tra il 2002 ed il 2016 la perdita di ghiaccio da parte della Groenlandia ha contribuito ad un tasso di innalzamento del livello medio degli oceani di circa 7.9 mm. Per quanto riguarda l'Antartide il tasso risulta essere di circa 4 mm ogni dieci anni. In entrambi i casi il tasso di innalzamento risulta essere accelerato tra il 1992 ed il 2010 (Rignot et al., 2011). Il monitoraggio del bilancio di massa delle calotte di ghiaccio è di fondamentale importanza per meglio comprendere il loro contributo all'innalzamento del livello medio del mare.

La fusione superficiale è uno dei più importanti processi che governano il bilancio di massa superficiale. Uno strumento di fondamentale importanza per il monitoraggio della fusione superficiale sono i sensori passivi che operano nella banda spettrale delle microonde (Tedesco, 2009; Fettweis et al., 2011). Questi sensori misurano l'energia naturalmente emessa dalla superficie terrestre, la temperatura di brillantezza ( $T_b$  [K], Ulaby et al., 1986) e sono caratterizzati da un'alta risoluzione temporale (almeno un dato ogni due giorni), una lunga copertura temporale (1979-oggi) ed un'ampia copertura spaziale, in particolar modo ai poli dove il satellite passa più volte nel corso della giornata. Il principale limite di questi sensori è la bassa risoluzione spaziale (25 km per la frequenza di 37 GHz). Le tecniche di rilevamento della fusione superficiale si basano sulla forte differenza in emissività tra neve secca e neve bagnata (Macelloni et al., 2005). La comparsa all'interno del manto nevoso di una piccola quantità di acqua allo stato liquido (liquid water content, LWC) conseguente ad un processo di fusione in corso si traduce in un forte incremento nel segnale di  $T_b$ , rendendo così possibile classificare giorni ed aree in fusione.

In questo lavoro di tesi è stato utilizzato un nuovo dataset a migliorata risoluzione spaziale (3.125 km a 37 GHz, disponibile grazie al progetto NASA MeASURES) per mappare la fusione superficiale di Groenlandia ed Antartide e studiarne la variabilità temporale sul lungo periodo.

#### **2) Materiali e metodi**

In questo lavoro di tesi è stato utilizzato un dataset di nuova generazione di mappe di  $T_b$  a 37 GHz (polarizzazione orizzontale) alla migliorata risoluzione spaziale di 3.125 km, disponibile grazie ad un nuovo algoritmo di re-gridding. Sono stati selezionati i seguenti sensori: SMMR-Nimbus 7, SSM/I (F08, F11 e F13) e SSMI/S-F17. La copertura temporale del dataset utilizzato in questo lavoro va dal 1979 fino al 2016 (ora aggiornato al 2019). Per migliorare la consistenza della serie temporale e ridurre l'errore proveniente dalle differenze costruttive dei diversi sensori utilizzati è stato necessario calibrare parte del dataset attraverso l'applicazione di coefficienti di correzione ottenuti dalla regressione lineare dei dati rilevati nei giorni in cui i due sensori hanno operato in sovrapposizione.

Per la classificazione dei giorni di fusione sono stati testati cinque algoritmi basati sul superamento della soglia. Il più semplice è una soglia fissa di 245 K, considerato il valore di  $T_b$  oltre il quale l'ulteriore comparsa di

LWC non comporta un aumento di  $T_b$  (Tedesco, 2009). Sono state poi utilizzate tre soglie (chiamate  $M+\Delta T$ ) basate sull'incremento  $\Delta T$  dovuto alla presenza di LWC rispetto alle condizioni di neve secca ( $M$ ), calcolate come la media della  $T_b$  dei mesi invernali. I valori di  $\Delta T$  selezionati sono 30 K, proposto da Zwally & Fiegles (1994), 35 K e 40 K, per testare la sensitività di questo parametro. Infine, è stato utilizzato un algoritmo basato su simulazioni del modello elettromagnetico MEMLS per stimare l'incremento  $\Delta T$  in modo dinamico (spazio-variante), secondo la metodologia proposta da Tedesco (2009). Questo algoritmo (chiamato per semplicità MEMLS) è progettato per identificare eventi di fusione sporadica, quando il contenuto di LWC raggiunge lo 0.2% in volume, garantendo in linea teorica consistenza in termini di minimo LWC.

Per valutare le performance degli algoritmi proposti sono stati utilizzati dati di temperatura dell'aria (Tedesco, 2009) misurata dal network di stazioni meteorologiche del Greenland Climate Network (GC Net) per la Groenlandia e dell'Antarctica Automatic Weather Stations Program (AAWSP) per l'Antartide. Sono stati valutati errori di commission, quando l'algoritmo classifica il dato satellitare come fusione mentre la temperatura misurata è sotto la soglia di fusione, e, viceversa, omission. Le soglie utilizzate per la temperatura misurata sono di  $0^\circ\text{C}$ ,  $-1^\circ\text{C}$  e  $-2^\circ\text{C}$  (come analisi di sensitività in quando il processo di fusione può avvenire al di sotto degli  $0^\circ\text{C}$  per fenomeni radiativi). Per questo motivo è stato fatto un ulteriore confronto con gli output del regional climate model MAR (Fettweis et al., 2011), considerando le simulazioni di LWC nei primi 5 cm ed 1 m del manto nevoso (solo per il caso della Groenlandia). Un esempio delle serie temporali utilizzate per la Groenlandia è mostrato in Figura 1.

Sono stati infine calcolati i principali indici descrittivi della fusione superficiale da letteratura. Il giorno di inizio e fine della fusione (melt onset date, MOD, e melt end date, MED) sono stati calcolati come primi ed ultimi due giorni consecutivi in cui è stata classificata fusione. La durata della fusione (melt duration, MD, un esempio in Figura 2, per l'Antartide) è stata calcolata come il totale dei giorni classificati come fusione. Questi indici, calcolati per ogni pixel, sono stati poi mediati per ottenere dei parametri sintetici. Sono stati poi calcolati la massima estensione della fusione (maximum melting surface, MMS) come superficie in cui è stata rilevata fusione superficiale almeno in un giorno dell'anno ed un parametro cumulato (melt index, MI) come numero di giorni di fusione per superficie in fusione. Di questi parametri sono stati calcolati i trend temporali e di questi è stata valutata la significatività statistica.

### 3) Risultati

Applicando gli algoritmi selezionati, sono state create mappe di fusione a scala giornaliera dal 1979 al 2016. Dal confronto con i dati di temperatura dell'aria misurata e gli output di MAR si sono ottenuti ottimi risultati per la Groenlandia. La soglia fissa di 245 K si è rivelata essere la più conservativa, in parte sottostimando la fusione superficiale, ma capace di rilevare gli eventi di fusione intensa. Le soglie  $M+30$  K,  $M+35$  K e  $M+40$  K hanno mostrato un problema di sovrastima della fusione, in termini sia di durata sia di estensione, classificando un elevato numero di falsi positivi. Questo problema non è stato riscontrato nel caso della soglia calcolata con MEMLS. Questo algoritmo ha infatti mostrato i migliori risultati in termini di errore di commission ed omission, mostrandosi capace di rilevare eventi di fusione sporadica. Per quanto riguarda l'Antartide il confronto con i dati misurati non mostra risultati egualmente soddisfacenti. Una possibile spiegazione è legata ad un limite della frequenza selezionate, che pur essendo alla più elevata risoluzione disponibile può essere influenzata dalla presenza di nubi ed i diversi processi che influenzano i cicli di fusione e congelamento in Antartide rispetto alla Groenlandia. L'utilizzo di una frequenza più bassa (ad esempio 19 GHz) potrebbe portare a migliori risultati, eliminando l'interferenza degli eventi di precipitazione intensa. Secondo i risultati ottenuti relativi alle performance degli algoritmi sono state scelte le soglie 245 K e MEMLS per il calcolo dei trend.

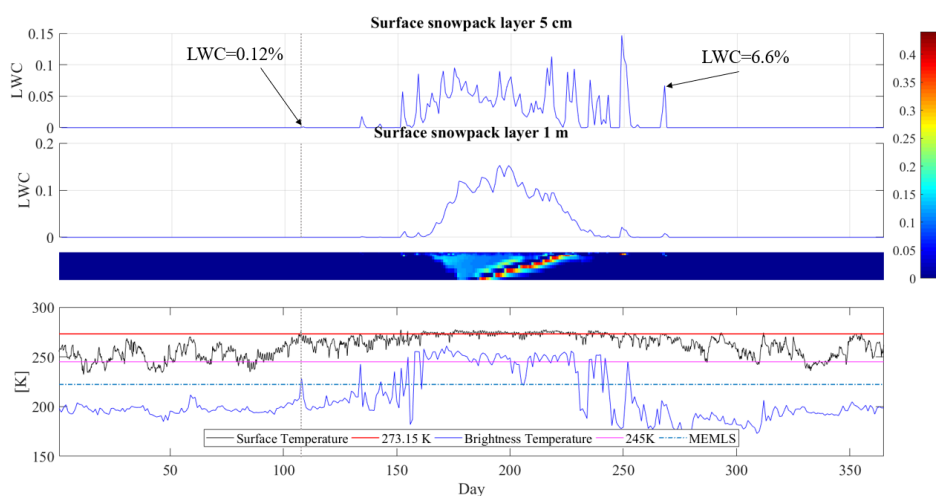
Valutate le performance degli algoritmi si sono calcolati i trend degli indici di fusione selezionati. Considerando i risultati del confronto con i dati a terra si ritengono più affidabili i trend calcolati per la Groenlandia, di cui sono riportati i risultati sintetici in Figura 3. La stagione di fusione è mediamente aumentata di 3.5 (4) giorni per decade secondo la soglia 245 K (MEMLS), il melt index è aumentato dell'1.8% ogni anno rispetto al valore del 1979 e la superficie massima di fusione è aumentata dello 0.17% e dell'1.19% ogni anno. Per quanto riguarda l'inizio e la fine della stagione di fusione, si sono ottenuti trend statisticamente significativi

solo nelle aree più vicine all'oceano, con una media di 0.86 giorni d'anticipo ogni anno dell'inizio della fusione e 0.87 giorni di ritardo della fine della fusione. Per quanto riguarda l'Antartide invece non sono stati trovati trend statisticamente significativi. Questo risultato è però meno credibile, considerando i limiti prima menzionati del dataset e dei metodi nel continente Antartico.

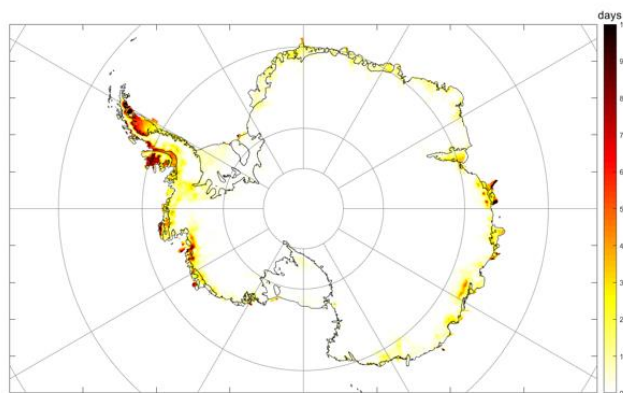
#### 4) Conclusioni

Il ritiro dei ghiacci delle calotte della Groenlandia e dell'Antartide registrato negli ultimi decenni è stato accompagnato da un generale aumento della fusione superficiale. Per la Groenlandia, i trend calcolati in questo lavoro di tesi mostrano un aumento in termini di durata ed estensione spaziale della fusione superficiale, con intensità maggiore nelle stesse aree dove è stata registrata la più intensa perdita di massa glacializzata. Per quanto riguarda l'Antartide sono invece necessari ulteriori approfondimenti per ottenere dei risultati più affidabili, utilizzando dati da diversi canali e simulazioni da modelli climatici.

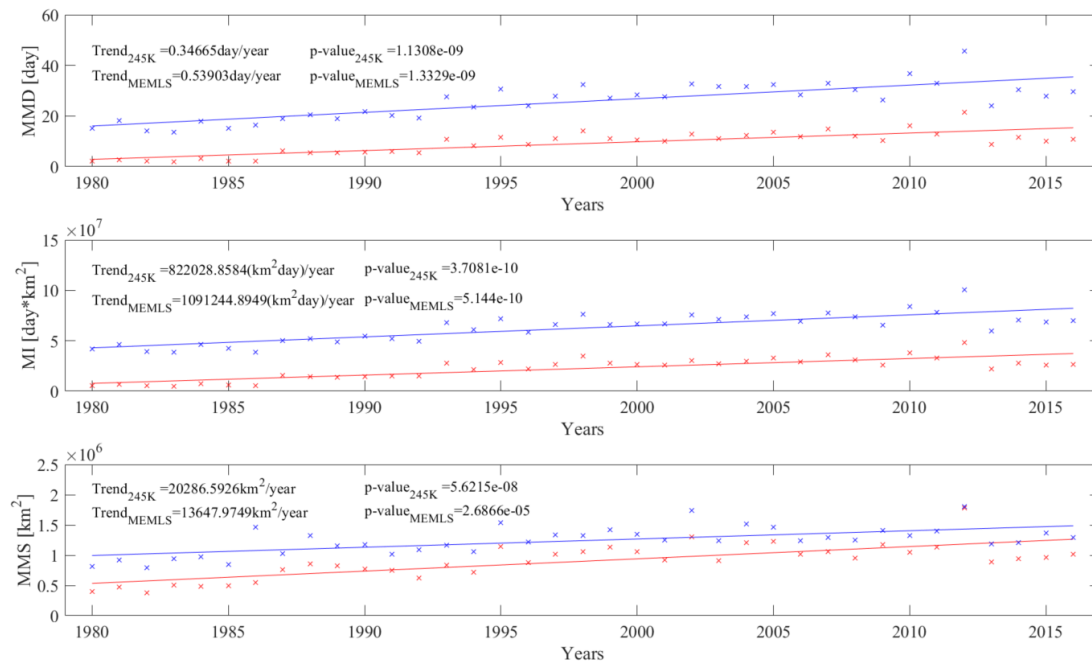
#### 5) Figure



**Figura 1** Serie temporale dei dati utilizzati per la Groenlandia alla stazione di Swiss Camp (2001). Nei due pannelli in alto il contenuto di acqua liquida rispettivamente nei primi 5 cm ed 1 m di manto nevoso, del cui profilo verticale è rappresentata la serie temporale nel terzo pannello. In basso, la serie temporale della temperatura di brillantezza (blu) e della temperatura dell'aria (nero). Le soglie sono rappresentate come linee orizzontali.



**Figura 2** Mappa della durata della fusione in Antartide per l'estate 2008-2009, calcolata come numero totale di giorni di fusione rilevati.



**Figura 3** Trend dei principali parametri sintetici di fusione (MMD, durata media della fusione; MI, melt index; MMS, massima estensione della fusione) calcolati per la Groenlandia.

## 6) Bibliografia

- Fettweis, X., Tedesco, M., van den Broeke, M., & Ettema, J. Melting trends over the Greenland ice sheet (1958–2009) from spaceborne microwave data and regional climate models, *The Cryosphere*, 5, 359–375, 2011.
- Macelloni, G., Paloscia, S., Pampaloni, P., Brogioni, M., Ranzi, R. & Crepaz, A. Monitoring of melting refreezing cycles of snow with microwave radiometers: The Microwave Alpine Snow Melting Experiment (MASMEx 2002-2003), *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(11), 2431-2442, 2005.
- Portner, H.O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J. & Rama, B. IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, 2019.
- Rignot, E., Velicogna, I., van den Broeke, M.R., Monaghan, A. & Lenaerts, J.T.M. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise, *Geophysical Research Letters*, 38(5), 2011.
- Tedesco, M. Assessment and development of snowmelt retrieval algorithms over Antarctica from K-band spaceborne brightness temperature (1979–2008), *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 979–997, 2009.
- Tedesco, M. & Fettweis, X. Unprecedented atmospheric conditions (1948-2019) drive the 2019 exceptional melting season over the Greenland ice sheet, *The Cryosphere*, 14(4), 1209–1223, 2020.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K., & Fung, A.K. Microwave remote sensing: Active and passive. Volume 3-From theory to applications, 1986.
- Zwally, H.J. & Fiegles, S. Extent and duration of Antarctic surface melting, *Journal of Glaciology*, 40(136), 463–475, 1994.