

Alessandro Silvano

ICEBERGS IN A LARGE GREENLAND GLACIAL FJORD

Università degli Studi di Torino, Scuola di Scienze della Natura

Corso di Laurea Magistrale in Fisica dei Sistemi Complessi, A.A. 2013/2014

Relatori: Dott. F. Straneo (Woods Hole Oceanographic Institution, USA), Dott. A. Provenzale (ISAC-CNR, Torino)

INTRODUZIONE

In generale la calotta glaciale della Groenlandia è sorgente di un significativo quantitativo di acqua dolce che si riversa nell'Oceano Atlantico, contribuendo per circa 0.7mm/anno all'innalzamento globale del livello del mare (*Rignot et al.*, 2011). Circa un quarto dell'innalzamento complessivo degli oceani degli ultimi 20 anni è stato stimato essere causato dalla perdita di massa dei ghiacciai con termine marino (*marine-terminating glaciers*) della Groenlandia (*Straneo & Heimabck*, 2013). Tale contributo è circa il doppio di quello dovuto allo scioglimento dei ghiacci antartici. L'input di acqua dolce ad alte latitudini avviene tramite due meccanismi principali. Il primo è lo scioglimento diretto dei ghiacciai all'interfaccia con l'oceano: essi costituiscono una sorgente puntuale di acqua dolce. Il secondo invece è dovuto alla fusione degli *iceberg* staccatisi dai ghiacciai (fenomeno denominato *calving*). Essi si muovono nei fiordi della Groenlandia e nell'oceano aperto, costituendo quindi una sorgente mobile di acqua dolce. Gli studi più recenti mostrano come il flusso di acqua dolce nei mari della Groenlandia, compreso quello dovuto alla fusione degli *iceberg*, sia aumentato dall'inizio degli anni 2000 (*Enderlin et al.*, 2014). Inoltre tale flusso, ad alte latitudini, influenza fortemente la circolazione termohalina e la formazione di acqua profonda (*Stouffer et al.*, 2006). Una sorgente mobile (come gli *iceberg*), o una sorgente puntuale (come i ghiacciai della Groenlandia) hanno, con buona probabilità, un differente impatto su tale circolazione.

Il lavoro di questa tesi di laurea ha come scopo quello di studiare la forzanti che influenzano il moto e la fusione degli *iceberg* in un fiordo della Groenlandia. Il fiordo in questione è quello di Sermilik, situato a sud-est della Groenlandia. Al fondo di esso è presente uno dei cinque *marine-terminating glacier* più massivi di tutto l'emisfero boreale, *Helheim*.

STRUMENTO E METODO

E' possibile sfruttare un'esistente tecnologia per l'osservazione di *iceberg*, oltre che di ghiaccio marino (banchisa). Gli strumenti sono i PIES (*pressure inverted echo sounders*). Essi vengono posizionati sul fondo del mare e misurano il tempo che un segnale acustico (*travel time*, τ), emesso dal proprio trasduttore, impiega a ritornare indietro dopo una riflessione con la superficie del mare oppure con l'interfaccia tra acqua e ghiaccio (*iceberg* o ghiaccio marino). Un PIES è stato posizionato nel fiordo di Sermilik da scienziati del Woods Hole Oceanographic Institution nell'agosto del 2011, e recuperato l'estate successiva.

L'alta frequenza di campionamento di questo strumento permette di rilevare il passaggio di *iceberg*, di valutare la loro velocità e di ottenere un *range* della loro profondità. Ciò è possibile esclusivamente da ottobre a giugno, poiché durante l'estate il segnale è molto rumoroso, probabilmente a causa della presenza di macro-plankton, il quale può riflettere il segnale acustico emesso dallo strumento. In particolare, per ricavare la velocità degli *iceberg* si sfrutta la cosiddetta *reflection curve*, cioè la curva che identifica il passaggio di un *iceberg* (Figura 1.a). Essa descrive la variazione nel tempo (t) del *travel time* τ , dovuta al transito di un *iceberg* sopra il PIES. Dal coefficiente angolare del fit lineare di τ^2 in funzione di t^2 si ottiene la velocità degli *iceberg* (Andres et al., 2014, Figura 1.b).

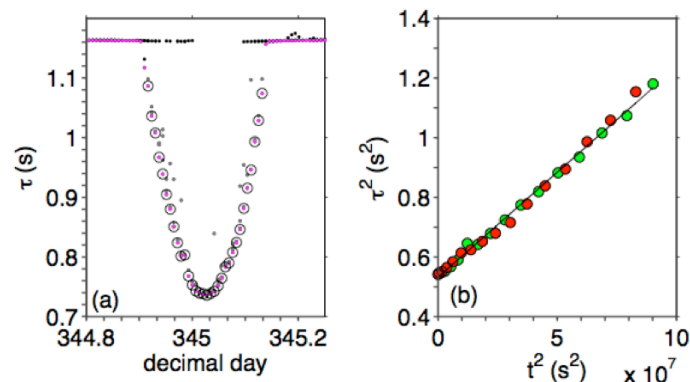


Figura 1: a) Esempio di *reflection curve* indicativa del passaggio di un *iceberg* sopra il PIES. Sull'asse delle ordinate è rappresentato il *travel time* τ (s), mentre l'asse delle ascisse rappresenta il tempo (in giorni decimali), cioè quando il segnale è stato acquisito dallo strumento. b) Fit lineare, τ^2 (t^2), del transito del medesimo *iceberg* raffigurato nelle figura 1.a.

RISULTATI E INTERPRETAZIONI

Grazie a questo strumento è stato possibile valutare la velocità di centinaia di *iceberg*. La distribuzione della velocità è di tipo gaussiano con velocità media di 0.2 m/s e deviazione standard di 0.1 m/s. Inoltre gli *iceberg* sono in media più profondi di 100 m.

Le due forze principali che influenzano la dinamica degli *iceberg* sono le forze di trascinamento del vento (F_A) e dell'acqua (F_w). Il ghiaccio marino è raramente presente e quindi l'attrito che potrebbe generare non è rilevante. Per il principio di Archimede circa il 90% del volume totale degli *iceberg* è sotto la superficie del mare. Di conseguenza la superficie su cui agisce F_w è molto maggiore di quella su cui agisce F_A . Per studiare il peso di venti e correnti marine confrontiamo le velocità degli *iceberg* con i dati di velocità delle correnti e dei venti nel fiordo. La correlazione è fortemente significativa con le correnti mentre non lo è con i venti. La conseguenza è che la forza di trascinamento dell'acqua è la più importante e "guida" gli *iceberg* all'interno del fiordo. Un'ulteriore conferma è data dal fatto che il rapporto tra F_A e F_w è molto piccolo ($< 1/e$) in più dell'80% delle misurazioni. Infatti un vento per generare lo stessa forza deve essere essere più veloce delle correnti marine di circa due ordini di grandezza. Le correnti marine nel fiordo hanno una velocità di circa 15-20 cm/s nei primi 200 m, dove si muove la maggior parte degli *iceberg*. Di conseguenza i venti devono essere di circa 15-20 m/s per contribuire in maniera non trascurabile al moto degli *iceberg*. Tuttavia soltanto i venti catabatici possono raggiungere tali intensità nei fiordi, ma sono molto rari e di breve durata.

L'ultima parte del lavoro è dedicata allo studio del *melting* (fusione) degli *iceberg*. Ci sono due principali meccanismi che causano tale fusione. Il primo è l'erosione dovuta all'onde del mare. Non sono presenti misure di onde in Groenlandia e quindi non è possibile valutare tale contributo. Il secondo meccanismo è dovuto alla turbolenza che si genera all'interfaccia acqua-ghiaccio, in quanto gli *iceberg* e l'acqua che li circonda si muovono a velocità diverse. Si crea di conseguenza uno strato all'interfaccia responsabile del trasporto di calore (di tipo turbolento) all'interno dell'*iceberg*, con conseguente fusione. Per stimare la velocità a cui si fonde un *iceberg* per turbolenza, cioè il *turbulent melt rate* (M_T), possiamo sfruttare le equazioni di *Silva et al.* (2006). Esse descrivono lo scioglimento degli *iceberg* in Antartide. Il risultato della nostra analisi mostra come M_T dipenda dalla velocità relativa tra *iceberg* e acqua v_r , e dalla temperatura dell'acqua T_w (figura 2).

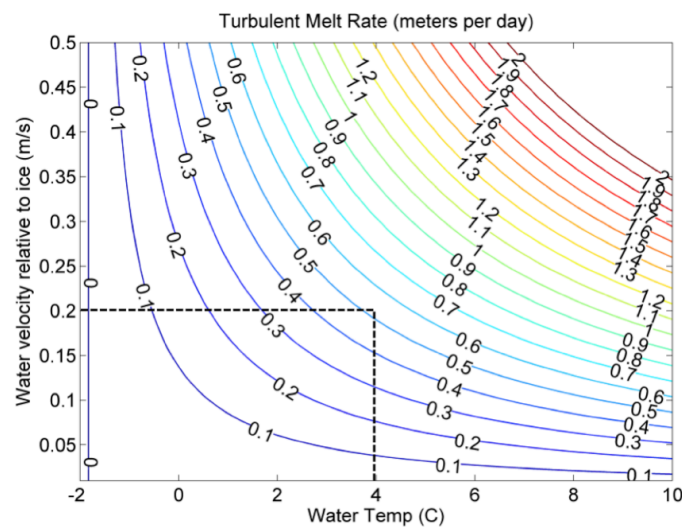


Figura 2: *Turbulent melt rate* (m/giorno) degli *iceberg* in funzione della velocità relativa tra essi e l'acqua (m/s) e della temperatura dell'acqua (°C). All'interno del riquadro delimitato dalla linea tratteggiata sono indicati i valori di M_T riscontrabili nel fiordo di Sermilik.

Utilizzando i dati a nostra disposizione di T_w e v_r si ottiene che i valori tipici di M_T variano tra 0.1 e 0.2 m/giorno. Tali valori sono confrontabili con quelli stimati per il *melt rate* del ghiacciaio *Helheim* (*Sciascia et al.*, 2013). Questo risultato è molto importante, poiché esprime il fatto che il contributo degli *iceberg* al flusso d'acqua dolce non è trascurabile. Per stimare il contributo effettivo bisogna moltiplicare il *melt rate* per la superficie totale esposta al *melting*. Bisogna quindi conoscere il numero totale di *iceberg* nel fiordo, nonché la forma di ognuno di essi. Sfortunatamente non abbiamo dati a riguardo. Sicuramente un obiettivo degli scienziati nel prossimo futuro sarà quello di stimare tale superficie (e il contributo dovuto all'erosione delle onde) in modo tale da poter valutare l'impatto dello scioglimento degli *iceberg* nel nord dell'Atlantico. L'obiettivo primario è quello di inserire gli *iceberg* nei modelli climatici, migliorando così le proiezioni sul clima futuro. Nell'emisfero boreale tale contributo potrebbe essere molto importante, se non addirittura più rilevante di quello dovuto alla fusione dei ghiacciai all'interfaccia con l'oceano. Infatti nei principali fiordi della Groenlandia ci sono migliaia di *iceberg* e la loro superficie esposta al *melting* è verosimilmente molto maggiore di quella dei ghiacciai. Per esempio, in Antartide lo studio di *Silva et al.* (2006) mostra come il flusso di acqua dolce nel Oceano Antartico dovuto allo scioglimento degli *iceberg* sia dello stesso ordine di grandezza dell'apporto dovuto alla precipitazione e molto maggiore di quello dovuto alla fusione della *ice shelf* antartica. E' possibile che anche in Groenlandia gli *iceberg* giochino un ruolo essenziale.

CONCLUSIONI

Il lavoro svolto in questa tesi ha permesso di mostrare l'efficacia del metodo e dello strumento (PIES) per lo studio degli *iceberg* nel fiordo di Sermilik. Si sono potuti studiare centinaia di *iceberg*, molto più che in passato. Infatti i pochissimi dati disponibili prima di questo lavoro, sono stati raccolti da crociere oceanografiche, grazie alle quali venivano seguiti gli *iceberg* durante la loro traiettoria. Ovviamente tale metodo risulta molto costoso e pochissimi *iceberg* possono essere studiati.

I risultati mostrano come le correnti marine "guidino" gli *iceberg* all'interno del fiordo. Il *turbulent melt rate* degli *iceberg* è confrontabile con il *melt rate* del ghiacciaio *Helheim*. Di conseguenza il contributo degli *iceberg* al flusso di acqua dolce non è trascurabile e dovrà essere stimato in futuro. Questo lavoro rappresenta il primo studio dinamico e termodinamico basato su dati riguardanti gli *iceberg* in Groenlandia. La sua importanza risiede nel fatto che la metodologia sviluppata e utilizzata potrà essere sfruttata in futuro per ulteriori studi negli oceani ad alte latitudini, visti i bassi costi.

Questo studio, svolto al *Woods Hole Oceanographic Institution*, è stato oggetto di un primo articolo scientifico sul metodo e sullo strumento (Andres, Silvano, Straneo & Watts, 2014). Inoltre, è attualmente in fase di scrittura un secondo articolo sui risultati dell'analisi dei dati (Silvano, Straneo & Andres).

Bibliografia

Andres, M., Silvano, A., Straneo, F., Watts, D. R. (2014). Eulerian measurements of icebergs and sea ice from inverted echo sounders. Submitted to *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*.

Enderlin, E. M., Howat, I. M., Jeong, S., Noh, M. J., Angelen, J. H., & Broeke, M. R. (2014). An Improved Mass Budget for the Greenland Ice Sheet. *Geophysical Research Letters*, 41(3), 866–872. doi:10.1002/2013GL059010. Received.

Rignot, E., Velicogna, M. R. van den Broeke, A. Monaghan & J. Lenaerts, 2011: Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophysical Research Letter*, 38, L05503, doi:10.1029/2011GL046583.

Sciascia, R., Straneo, F., Cenedese, C., & Heimbach, P. (2013). Seasonal variability of submarine melt rate and circulation in an East Greenland fjord. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(5), 2492–2506. doi:10.1002/jgrc.20142.

Silva, T. A. M., Bigg, G. R., & Nicholls, K. W. (2006). Contribution of giant icebergs to the Southern Ocean freshwater flux. *Journal of Geophysical Research*, 111(C3), C03004. doi: 10.1029/2004JC002843.

Stouffer, R. J., & Coauthors, 2006: Investigating the causes of the response of the thermohaline circulation to past and future climate changes. *Journal of Climate*, 19, 1365–1387.

Straneo, F., Heimbach, P., (2013). North Atlantic warming and the retreat of Greenland's outlet glaciers. *Review, Nature*, doi:10.1038/nature12854.