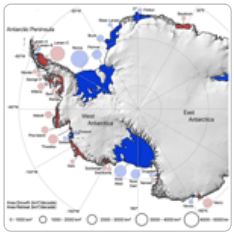
https://doi.org/10.5194/tc-17-2059-2023
© Autore/i 2023. Questo lavoro è distribuito sotto
la licenza Creative Commons Attribution 4.0.

Articolo di ricerca

16 maggio 2023

Cambiamento nell'area della piattaforma di ghiaccio antartica dal 2009 al 2019



Julia R. Andreasen, Anna E. Hogg e Heather L. Selley

Pdf by:
https://www.pro-memoria.info

Astratto

Le piattaforme di ghiaccio antartiche forniscono un sostegno alla calotta glaciale, stabilizzando il flusso del ghiaccio sterrato e il suo contributo al livello globale del mare. Negli ultimi 50 anni, le osservazioni satellitari hanno mostrato che le piattaforme di ghiaccio crollano, si assottigliano e si ritirano; tuttavia, ci sono poche misurazioni del cambiamento in tutta l'Antartide nell'area della piattaforma di ghiaccio. Qui, utilizziamo i dati satellitari MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) per misurare il cambiamento nella posizione anteriore e nell'area di parto della piattaforma di ghiaccio su 34 piattaforme di ghiaccio in Antartide dal 2009 al 2019. Nell'ultimo decennio, una riduzione dell'area della penisola antartica (6693 km2) e dell'Antartide occidentale (5563 km2) è stata superata dalla crescita dell'area nell'Antartide orientale (3532 km2) e nelle grandi piattaforme di ghiaccio di Ross e Ronne-Filchner (14 028 km2). Il più grande ritiro è stato osservato sulla piattaforma di ghiaccio Larsen C, dove 5917 km2 di ghiaccio sono stati persi durante un evento di parto individuale nel 2017, e il più grande aumento dell'area è stato osservato sulla piattaforma di ghiaccio di Ronne nell'Antartide orientale, dove un graduale avanzamento nell'ultimo decennio (535 km2 anni-1) ha portato a un guadagno Nel complesso, l'area della piattaforma di ghiaccio antartica è cresciuta di 5305 km2 dal 2009, con 18 piattaforme di ghiaccio che si ritirano e 16 piattaforme più grandi che crescono nell'area. Le nostre osservazioni mostrano che le piattaforme di ghiaccio antartiche hanno guadagnato 661 Gt di massa di ghiaccio nell'ultimo decennio, mentre l'approccio allo stato stazionario stimerebbe una sostanziale perdita di ghiaccio nello stesso periodo, dimostrando l'importanza di utilizzare le osservazioni del flusso di parto variabile nel tempo per misurare il cambiamento.

Come citare.Andreasen, J. R., Hogg, A. E., e Selley, H. L.: Cambiamento nell'area della piattaforma di ghiaccio antartica dal 2009 al 2019, The Cryosphere, 17, 2059–2072, https://doi.org/10.5194/tc-17-2059-2023, 2023.

Ricevuto: 12 ottobre 2022 – Discussione avviata: 01 novembre 2022 – Rivisto: 10 marzo 2023 – Accettato: 08 aprile 2023 –Pubblicato: 16 maggio 2023

1 Introduzione

Le piattaforme di ghiaccio costellano tre quarti della costa antartica, fornendo supporto di sostegno al ghiaccio a terra e collegando la calotta glaciale con l'Oceano Antartico. Il fronte del parto rappresenta il limite verso il mare del bordo della piattaforma di ghiaccio ed è il confine del margine costiero antartico. La posizione anteriore del parto (CFL) può cambiare gradualmente attraverso una crescita o un ritiro sostenuti (Cook e Vaughan, 2010) o più improvvisamente a causa di grandi eventi come il parto degli iceberg (Hogg e Gudmundsson, 2017) e il crollo della piattaforma di ghiaccio (Rott et al., 1996; Rack and Rott, 2004; Padman et al., 2012). La mappatura della posizione del fronte di parto variabile nel tempo sulle piattaforme di ghiaccio antartiche è importante (i) per stimare il budget totale di acqua dolce della piattaforma di ghiaccio, (ii) come precursore dell'instabilità dinamica e quindi del contributo del livello del mare della calotta glaciale, (iii) come indicatore del cambiamento delle condizioni strutturali della piattaforma di ghiaccio e (iv) come Le osservazioni satellitari hanno dimostrato che una riduzione dell'area della piattaforma di ghiaccio può causare l'assottigliamento dei ghiacciai a monte (Scambos et al., 2004) e accelerare fino a 8 volte la loro velocità precedente (Rignot et al., 2004), aumentando il contributo dinamico del livello del mare del ghiaccio dalla regione interessata. Alcune zone di ghiaccio galleggiante forniscono una stabilità strutturale significativamente maggiore alla calotta glaciale, con l'entroterra glaciale dell'arco compresso o a contatto con un punto di pinning che innesca l'instabilità in caso di smarrimento (Holland et al., 2015). L'effetto del cambiamento nell'area della piattaforma di ghiaccio non è sempre locale, con studi che dimostrano che le piattaforme di ghiaccio forniscono un supporto di vasta portata al ghiaccio a terra a centinaia di chilometri di distanza (Fürst et al., 2016). Tuttavia, molti eventi di parto dell'iceberg fanno parte del ciclo naturale dell'evoluzione della piattaforma di ghiaccio, con la costante ricrescita e l'avanzamento del fronte del parto tipicamente visto dopo un evento di parto (Hogg e Gudmundsson, 2017).

Negli ultimi 30 anni, è stato osservato che le piattaforme di ghiaccio in tutta l'Antartide avanzano costantemente, si ritirano dopo gli eventi di parto dell'iceberg e collassano catastroficamente, come si vede nel caso del Larsen A (Rott et al., 1996), Larsen B (Rack and Rott, 2004) e delle piattaforme di ghiaccio Wilkins (Padman et Il monitoraggio del cambiamento nella posizione anteriore del parto è un parametro di input vitale per i modelli di flusso di ghiaccio, in quanto viene utilizzato per informare gli studi sui processi di parto e sulle loro forze trainanti (Trevers et al., 2019) ed è necessario per calcolare il cambiamento di massa della piattaforma di ghiaccio dal parto, una parte componente del budget totale insieme alla fusione basale e all'input Le misurazioni della posizione della facciata del parto della piattaforma di ghiaccio sono state effettuate utilizzando una serie di metodi, tra cui osservazioni storiche basate sulle navi risalenti al 1842 sulla piattaforma di ghiaccio di Ross (Jacobs et al., 1986; Keys et al., 1998), delineazione manuale delle immagini acquisite dalla

Scarica
- Articolo (4399 KB)
- XML full-text
- Supplemento(104083 KB)
- BibTeX
- Nota finale

Breve riassunto
Ci sono poche osservazioni a lungo termine e ad alta risoluzione spaziale del cambiamento della piattaforma di ghiaccio in Antartide...
- Per saperne di più

Condividi

Articoli simili
Prevedere lo scioglimento del ripiano del ghiaccio indotto dall'oceano... Rosier et al.
Storia glaciologica e strutturale... Thompson et al.
Una valutazione della fusione basale... Burgard et al.

fotografia aerea (Cook et al., 2005) e satelliti radar ad apertura ottica e sintetica (La risoluzione spaziale, l'accuratezza e la frequenza di queste tecniche complementari variano, con l'estensione temporale e spaziale delle misurazioni frontali di parto che dipende in gran parte dal periodo di ripetizione e dalla copertura dei dati acquisiti e dall'intensità manuale della tecnica di elaborazione utilizzata. Mentre i dati precedenti all'era dei satelliti (pre-1960) sono estremamente limitati, i record storici sono un importante set di dati di riferimento per comprendere il cambiamento a lungo termine nella posizione del fronte glaciale e la sua risposta alla forzatura ambientale. A causa dell'importanza di questo parametro glaciologico, ci sono diverse pubblicazioni recenti che misurano il cambiamento nelle posizioni frontali del parto della piattaforma di ghiaccio antartica, dalle valutazioni regionali alle valutazioni complete a livello di continente (MacGregor et al., 2012; Lilien et al., 2018; Wuite et al., 2019; Baumhoer et al., 2018, 2019, In questo studio, espandiamo questo lavoro precedente e forniamo un'indagine circum-antartica mappando la posizione annuale della parte anteriore del parto su 34 piattaforme di ghiaccio intorno all'Antartide dal 2009 al 2019, utilizzando immagini satellitari MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Scambos et al., 1996). I risultati forniscono una valutazione completa della migrazione sul fronte del ghiaccio attraverso l'Antartide nell'ultimo decennio, espandendo i modelli storici di movimento del ghiaccio e consentendo di quantificare con precisione le aree di crescita e ritiro (Fig. 1).

2 Dati e metodi

Abbiamo misurato la posizione anteriore annuale del parto su 34 piattaforme di ghiaccio, che comprendono l'80 % della costa antartica, negli 11 anni dal 2009 al 2019 (Fig. 1). Abbiamo utilizzato oltre 350 immagini ottiche multispettrali, acquisite dallo strumento MODIS a bordo dei satelliti Terra e Aqua della NASA (Scambos et al., 1996; Tabella S1 nel supplemento). Le immagini acquisite durante l'estate australe, da metà gennaio alla fine di febbraio, sono state selezionate per tutto il decennio per garantire un campionamento coerente e per evitare di aliasing variazioni stagionali nella posizione anteriore del parto. Le immagini satellitari senza nuvole, con l'oceano aperto sul fronte del parto, sono state selezionate preferenzialmente quando possibile, poiché la presenza di ghiaccio marino e melange di iceberg può ridurre la precisione con cui la posizione del fronte del parto può essere identificata visivamente. Anche le immagini acquisite intorno a mezzogiorno sono state prioritarie, poiché l'illuminazione in questo momento fornisce un migliore contrasto, consentendo un'identificazione più chiara del bordo della piattaforma di ghiaccio. Il periodo di studio è iniziato nel 2009 su 30 piattaforme di ghiaccio; tuttavia, sulle piattaforme di ghiaccio Wordie, Baudouin, Nansen e Drygalski, le immagini adatte non sono state acquisite fino al 2011. Pertanto, quest'anno è stato utilizzato come prima data di inizio in queste tre regioni in tutto questo studio (Tabella 1). Abbiamo prodotto una misurazione annuale della posizione frontale del ghiaccio su 34 piattaforme di ghiaccio intorno all'Antartide delineando manualmente la posizione anteriore del parto nel punto in cui la superficie della piattaforma di ghiaccio è visibilmente passata all'oceano aperto o al ghiaccio marino in ogni immagine satellitare (Cook et al., 2005; Cook e Vaughan, 2010).

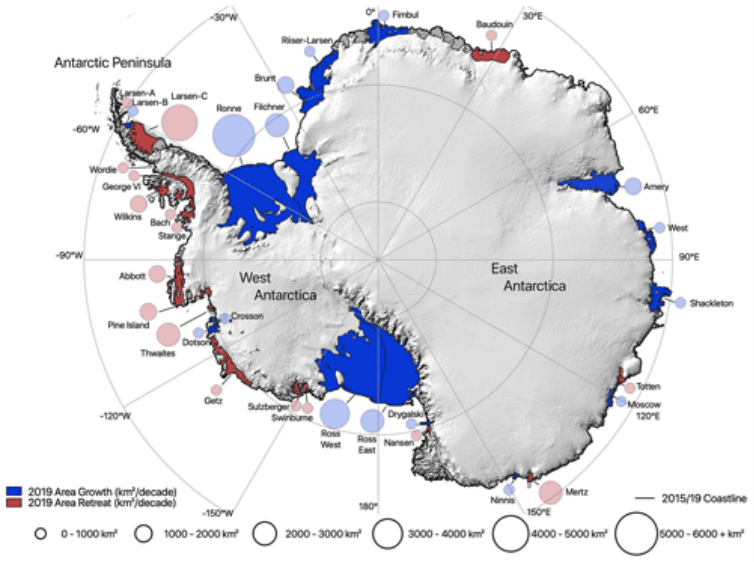


Figura 1La mappa antartica dell'area della piattaforma di ghiaccio cambia dal 2009 al 2019, con i nomi della piattaforma di ghiaccio sovrapporsi a una superficie Bedmap2 dell'Antartide. Le aree del cerchio indicano la quantità totale di area della piattaforma di ghiaccio (in km2) persa (rossa) o guadagnata (blu). La linea nera in grassetto rappresenta la costa antartica, combinando i dati del 2015 e del 2019.

I punti EQUIDistanza sono stati tracciati ogni ~1000 m lungo il fronte di ghiaccio, utilizzando una proiezione stereografica polare per standardizzare la scala della distanza, la densità dei punti e l'accuratezza del confine del fronte di parto su ogni piattaforma di ghiaccio. La posizione anteriore del parto della piattaforma di ghiaccio è in continua evoluzione, con la posizione misurata rappresentativa del timestamp dell'immagine satellitare utilizzata; tuttavia, ai fini di questo studio, supponiamo che questo rifletta la posizione annuale. L'accuratezza della posizione frontale del parto è limitata dalla precisione di georeferenziamento dell'immagine e dalla digitalizzazione del confine. Abbiamo valutato l'incertezza nella tecnica di misurazione delineando il confine anteriore del parto cinque volte, utilizzando l'immagine del 2017 sulla piattaforma di ghiaccio Dotson e quindi misurando la varianza dalla posizione media. I risultati mostrano che la deviazione standard della misurazione del fronte del parto è di 254 m, che presumiamo sia la nostra incertezza di misurazione. Questo riflette la risoluzione spaziale delle immagini MODIS, che ha una dimensione del pixel di 250×250 m. Le posizioni frontali di parto contemporanee di questo studio sono state combinate con misurazioni storiche sulla penisola antartica per estendere il record del cambiamento fino al 1947, tra cui le piattaforme di ghiaccio Larsen da A a C, George VI, Wilkins, Wordie, Bach e Stange (Cook e Vaughan, 2010). Nel complesso, questo studio ha prodotto 366 misurazioni del fronte di parto tra il 2009 e il 2019 e ha utilizzato 53 misurazioni storiche sulla penisola antartica per fornire la valutazione più estesa temporalmente e spazialmente del cambiamento nella posizione del fronte di ghiaccio in tutta l'Antartide.

L'area annuale di ogni piattaforma di ghiaccio è stata misurata dal 2009 al 2019 combinando le posizioni frontali di parto digitalizzate con una posizione della linea di messa a terra di riferimento, Making Earth Science Data Records for Use in Research Environments (MEaSUREs) Antarctic Grounding Line from Differential Satellite Radar Interferometry, Version 2 (Rignot et al., 2016), che La linea di messa a terra e le posizioni frontali di parto sono state poligonate e poi intersecate per ogni bacino di drenaggio antartico delimitato da una piattaforma di ghiaccio, con isole isolate e nunataks sottratti dall'area, creando un'area delimitata per ogni piattaforma di ghiaccio per ogni anno dello studio. La variazione totale dell'area nel periodo di studio decennale è stata calcolata differenziando la più recente osservazione dell'area della piattaforma di ghiaccio (2019) dalla più antica (2009 o 2011; tabella 1). Abbiamo calcolato il tasso medio annuo di parto dividendo la variazione totale dell'area per il numero di anni osservati e calcolato la variazione percentuale dell'area dividendo la variazione totale dell'area per l'area del 2009 (Tabella 1). Per valutare il cambiamento di volume e massa di ghiaccio causato dall'evoluzione del fronte di parto, abbiamo estratto lo spessore del ghiaccio da Bedmap2 (Fretwell et al., 2013) attraverso la posizione anteriore di parto più misurata nell'entroterra, che variava dal 2009 al 2019, a seconda della piattaforma di ghiaccio (Tabella 1). Abbiamo quindi calcolato uno spessore medio nella parte anteriore del parto per ogni ripiano. Abbiamo calcolato la variazione annuale della massa in ogni piattaforma di ghiaccio a causa dei processi di parto calcolando la variazione di volume nel ghiaccio parto e moltiplicando ogni area annuale per lo spessore medio del ghiaccio e la densità del ghiaccio (0,9166 Gt km−3). Il tasso medio di variazione del volume è stato calcolato dividendo la variazione del volume della piattaforma di ghiaccio che varia annualmente per il periodo di studio. Poiché l'accuratezza delle misurazioni dell'area della piattaforma di ghiaccio dipende sia dalle variazioni della larghezza che dalla lunghezza della costa, l'abbiamo arrotondata a 1 km2 di precisione, che è in linea con la metodologia degli studi precedenti (Cook e Vaughan, 2010), e per tenere conto degli errori all'interno della delimitazione frontale del parto (254 m). Lo stesso metodo di calcolo dell'area, del volume e del cambiamento di massa di parto è stato applicato alle posizioni storiche di facciata di parto nella penisola antartica.

Tabella 1Tabella riassuntiva con i dati su ciascuna piattaforma di ghiaccio, tra cui la variazione dell'area dal 2009 al 2019, la differenza assoluta, la differenza percentuale e il tasso di variazione tra la prima e l'ultima data registrata (gli scaffali di ghiaccio che hanno subito importanti eventi di parto sono indicati tra parentesi), l'anno e la quantità della variazione massima dell'area e il flusso I valori indicati in grassetto indicano che tali valori sono somme di raggruppamenti di piattaforme di ghiaccio (alias AP total, WAIS total, EAIS total, large shelf total e Antarctica total).

Ice shelf	First–last dates (yr)	Years observed (yr)	First recorded area (km^2)	Last recorded area (km^2)	Area difference 2009–2019 (km^2)	Area percentage change (%)	Rate of area change ($km^2\ yr^{-1}$)	Year of max area change (yr)	Max area change (km^2)	Observed calving flux (Gt)	Steady state calving flux (Gt)
Larsen A	2009–2019	11	32	22	−11	−32.5 %	−1	2011	−5	−1.4	−0.4
Larsen B	2009–2019	11	1850	2100	250	13.5 %	23	2014	35	57.6	−62.8
Larsen C	2009–2019	11	46 548	41 786	−4763	−10.2 %	(−433)	2017	−5917	−976	−397
George	2009–2019	11	23 484	22 882	−602	−2.6 %	−54.7	2010	−213	−92.8	−185.6
Wilkins	2009–2019	11	11 406	10 202	−1204	−10.6 %	(−109)	2009	−780	−64.3	−17.6
Wordie	2011–2019	9	87	48	−39	−45.2 %	−4	2013	−35	−4.1	−25.5
Bach	2009–2019	11	4553	4440	−113	−2.5 %	−10	2017	−43	−22.3	−11.4
Stange	2009–2019	11	8017	7806	−210	−2.6 %	−19	2014	−86	−34.2	−122.1
AP total	–	**10.8**	**95 978**	**89 286**	**−6692**	**−7.0 %**	–	–	–	**−1137.4**	**−822.5**
Swinburne	2009–2019	11	905	720	−185	−20.4 %	−17	2016	−44	−44.6	−27.5
Sulzberger	2009–2019	11	12 490	12 276	−214	−1.7 %	−19	2011	−142	−41.4	−86.7
Getz east	2009–2019	11	14 627	14 405	−222	−1.5 %	−20	2017	−87	−64.4	−167.8
Getz west	2009–2019	11	19 381	19 200	−181	−0.9 %	−16	2015	−238	−49.3	−555.2
Dotson	2009–2019	11	5791	5843	52	0.9 %	5	2016	−52	16.4	−60.5
Crosson	2009–2019	11	3545	3840	295	8.3 %	27	2014	196	83.3	−1352.8
Thwaites	2009–2019	11	5449	2525	−2924	−53.7 %	(−266)	2012	−2786	−1074	−2928.2
Pine Island	2009–2019	11	6264	5221	−1043	−16.6 %	−95	2013	−689	−309.6	−604.6
Abbot	2009–2019	11	31 827	30 686	−1141	−3.6 %	−104	2010	−309	−168.2	−98.1
WAIS total	–	**11**	**100 279**	**94 716**	**−5563**	**5.5 %**	–	–	–	**−1651.8**	**5881.4**
Brunt	2009–2019	11	37 180	39 061	1881	5.1 %	171	2014	336	251.3	−1119
Riiser	2009–2019	11	43 544	44 042	498	1.1 %	45	2011	111	98.8	−330
Fimbul	2009–2019	11	40 801	41 277	476	1.2 %	43	2013	127	90.6	−644.6
Baudouin	2011–2019	9	33 143	32 903	−239	−0.7 %	−27	2017	−175	−47.4	−273.3
Amery	2009–2019	11	60 797	62 299	1502	2.5 %	137	2013	230	386.8	−1609.8
West	2009–2019	11	15 855	16 342	488	3.1 %	44	2013	−668	90	−873.5
Shackleton	2009–2019	11	26 216	27 057	841	3.2 %	76	2013	152	150.7	−1703.6
Totten	2009–2019	11	6109	5956	−153	−2.5 %	−14	2015	−230	−42.7	−545.7
Moscow University	2009–2019	11	5899	6030	131	2.2 %	12	2015	−126	45.7	−486.3
Mertz	2009–2019	11	5409	3346	−2063	−38.1 %	(−188)	2010	−2451	−546.7	−404.7
Ninnis	2009–2019	11	1780	2048	268	15.1 %	24	2018	89	105.3	−1162.6
Nansen	2011–2019	9	2011	1865	−146	−7.2 %	(−16)	2016	−182	−19.1	−37.5
Drygalski	2011–2019	9	2335	2384	48	2.1 %	5	2017	27	9.4	−287.8
EAIS total	–	**10.5**	**28 1080**	**28 4612**	**3532**	**1.3 %**	–	–	–	**572.6**	**−11 751.4**
Ross east	2009–2019	11	194 738	196 789	2051	1.1 %	186	2013	254	181.7	−277.6
Ross west	2009–2019	11	306 983	310 828	3845	1.3 %	350	2013	476	826.1	−1186.6
Ronne	2009–2019	11	339 124	345 013	5889	1.7 %	535	2010	651	1089.8	−1273.3
Filchner	2009–2019	11	103 920	106 163	2243	2.2 %	204	2016	314	779.6	−1108.2
Large shelf total	–	**11**	**944 765**	**958 793**	**14 028**	**1.5 %**	–	–	–	**2877.2**	**−3845.6**
Antarctica total	–	**10.8**	**1 422 102**	**1 427 407**	**5304**	**0.4 %**	–	–	–	**660.6**	**−20 028.1**

Scarica la versione stampata | Scarica XLSX

3 Risultati e discussione

Questo studio presenta un record spazialmente e temporalmente esteso della posizione anteriore del parto e del cambiamento dell'area per 34 principali piattaforme di ghiaccio in Antartide, dal 2009 al 2019 (Fig. 1; Tabella 1), con tre di quegli scaffali misurati dal 2009 al 2021. Nel corso degli 11 anni dal 2009 al 2019, abbiamo osservato sei tipi distinti di comportamento frontale del parto della piattaforma di ghiaccio caratterizzato da (a) importanti eventi di parto, (b) rapido ritiro frontale del parto, (c) graduale ritiro anteriore del parto, (d) avanzamento con ritiro periodico, (e) avanzamento frontale rapido e (f) avanzamento frontale del parto costante (Fi S1 nel supplemento). Abbiamo raggruppato le piattaforme di ghiaccio in queste sei categorie per descrivere i cambiamenti osservati per fornire una valutazione dettagliata del comportamento delle piattaforme di ghiaccio in Antartide nell'ultimo decennio.

3.1 Grandi eventi di parto

I principali eventi di parto sono definiti come la perdita di una parte significativa della piattaforma di ghiaccio, >5 % della superficie totale, con conseguente produzione di uno o più iceberg in un breve periodo di tempo (eventi di calving che si sono verificati in meno di un mese). Sei piattaforme di ghiaccio in Antartide hanno vissuto importanti eventi di parto tra il 2009 e il 2019, tra cui le piattaforme di ghiaccio Wilkins, Wordie e Larsen C nella penisola antartica nel 2009, 2013 e 2017, rispettivamente, il ghiacciaio Thwaites nell'Antartide occidentale nel 2012 e le piattaforme di ghiaccio Mertz e Nansen nell'Antartide orientale nel 2010 La piattaforma di ghiaccio di Thwaites ha subito il più grande cambiamento di area relativa, perdendo un totale del 53,7 % (−2924 km2) della sua area originale (Tabella 1) a causa degli effetti combinati sia del parto dell'iceberg (evento di parto della lingua di ghiaccio del 2012) che del ritiro (Fig. S33). Tra il 1963 e il 2008, la piattaforma di ghiaccio Larsen C ha mantenuto il 91 % della sua superficie (50 837 km2; fronti di ghiaccio forniti da Cook e Vaughan, 2010); tuttavia, nel 2017, ha partottato un iceberg lungo >200 km (A68; Hogg e Gudmundsson, 2017), riducendo la sua superficie del 12,7% (−5917 S4).

La piattaforma di ghiaccio Wordie sul bordo occidentale della penisola antartica è diminuita di superficie del 90 % tra il 1966 e il 2008 (fronti di ghiaccio forniti da Cook e Vaughan, 2010), con conseguente quattro resti isolati della piattaforma di ghiaccio che sorampeggiano i ghiacciai Carlson, Prospect e Hariot e un residuo senza nome tra i ghiacciai Hariot e Fleming S7). Diversi aumenti di ghiaccio hanno svolto un ruolo stabilizzante cruciale nella zona di messa a terra di Wordie; tuttavia, fungono anche da cunei, scheggiando e indebolendo la piattaforma di ghiaccio dai tre ghiacciai tributari in entrata (Vaughan, 1993). Tra il 2011 e il 2019, la piattaforma di ghiaccio di Wordie ha perso il 45,2 % della sua superficie rimanente (tabella 1), con l'88 % di questa perdita causata da un evento di parto di 35 km2 nel 2013. Dopo un periodo di ritiro prolungato dal 1990 (Cook e Vaughan, 2010), le porzioni nord e ovest di Wilkins Ice Shelf si sono ritirate di 1204 km2 tra il 2009 e il 2010 (Fig. S6). Ciò era dovuto alla perdita di un ponte di ghiaccio largo 1 km sull'isola di Charcot, che si pensa sia causato da venti orientali che guidano il movimento ciclico e il mélange di ghiaccio pressurizzato contro il ponte di ghiaccio a causa dello stress del vento (Humbert et al., 2010).

Nel 2010, il ghiacciaio Mertz ha partomato un iceberg lungo 78 km (C28), perdendo il 45,3% della sua superficie originale (−2451 km2) dopo che l'iceberg B-09B, che ha partomato dalla piattaforma di ghiaccio di Ross nel 1987, si è scontrato con la lingua di ghiaccio galleggiante altamente crezonata (Fig. 2a, S Gli iceberg a terra intorno alla costa di Mertz influenzano la piattaforma galleggiante creando uno strato di copertura di ghiaccio veloce che estende la lunghezza della lingua di ghiaccio; inoltre, Mertz è responsabile del drenaggio dello 0,8 % dell'EAIS (Massom et al., 2015). La piattaforma di ghiaccio di Nansen è cresciuta costantemente ad un tasso medio di 7 km2 anni^{-1} dal 2011 al 2016; tuttavia, tra il 2016 e il 2017, l'8,9 % (182 km2) dell'area totale della piattaforma di ghiaccio è stata persa a causa del parto (Fig. S23). La frattura che ha formato gli iceberg C-33 e C-33b è stata registrata per la prima volta nel 1987, crescendo ad un tasso di 7 km al anno dal 2011 al 2013 (Li et al., 2016; Dziak et al., 2018), con l'eventuale parto nel 2016 che si pensa fosse innescato da una tempesta di bassa pressione (Dziak et Il ghiacciaio Mertz e la piattaforma di ghiaccio Nansen sono le uniche due regioni dell'Antartide orientale ad avere importanti eventi di parto tra il 2009 e il 2019 e sono due delle quattro piattaforme di ghiaccio nell'Antartide orientale a sperimentare una perdita netta di area nel periodo di studio di 11 anni. Dopo i loro eventi di parto, le piattaforme di ghiaccio Wilkins e Thwaites hanno continuato a ritirarsi a un ritmo più graduale, mentre la piattaforma di ghiaccio Mertz è stata riprocita e l'estensione della piattaforma di ghiaccio Wordie è rimasta relativamente statica. Tra il 2019 e il 2022, si sono verificati importanti eventi di parto sulla piattaforma di ghiaccio di Amery (settembre 2019; iceberg D-28; 1636 km2; Francis et al., 2021; Fig. S16), la piattaforma di ghiaccio Brunt (febbraio 2021; iceberg A-74; 1270 km2; Fig. S12), e la piattaforma di ghiaccio di Ronne (maggio 2021; iceberg A-76; 4310 km2; Fig. S10), espandendo significativamente la regione nell'Antartide orientale che ha subito una perdita netta di superficie dal 2009. Questa analisi degli eventi di parto su scala annuale fornisce dati solidi per studi futuri per valutare se c'è stato un aumento significativo del parto di iceberg nell'ultimo decennio o se il periodo di ripetizione più frequente di osservazioni satellitari ha catturato meglio la vera frequenza dei principali eventi di parto di iceberg in Antartide.

3.2 Ritiro frontale di parto rapido

Un rapido ritiro frontale del parto è definito come piattaforme di ghiaccio che hanno subito una perdita di ghiaccio sostenuta e significativa durante il periodo di studio di 11 anni (2009-2019), perdendo almeno il 15 % della loro superficie totale. Tre piattaforme di ghiaccio in Antartide hanno sperimentato un rapido ritiro frontale di parto tra il 2009 e il 2019, tra cui la piattaforma di ghiaccio Larsen A nella penisola antartica e il ghiacciaio Pine Island e la piattaforma di ghiaccio di Swinburne nell'Antartide occidentale (Fig. 3b). Queste piattaforme di ghiaccio sono alimentate da ghiacciai a flusso rapido, con conseguenti osservazioni di modesto avanzamento annuale (tipicamente tra l'1 % e il 2 %). Larsen Una piattaforma di ghiaccio nella penisola antartica nord-orientale aveva una superficie totale di 2929 km2 nel 1963 e iniziò a sperimentare qualche crollo negli anni '80 (Fig. S2; fronti di ghiaccio forniti da Cook e Vaughan, 2010). Nel gennaio 1995, un crollo di 2270 km2 di ghiaccio (Rott et al., 1996) ha lasciato Larsen A con solo 682 km2 della sua superficie originale dopo che gli stagni di acqua di fusione superficiale hanno innescato l'idrofrattura attraverso le fessure (Scambos et al., 2000). Dal 1995 al 2008, Larsen A ha registrato un costante ritiro del residuo della piattaforma di ghiaccio, con 637 km2 di ghiaccio persi, e dal 2009 al 2019, la piattaforma di ghiaccio Larsen A ha continuato a ritirarsi, perdendo altri 11 km2 di ghiaccio e lasciando un'area rimanente di 22 km2. In questo studio, tutti i calcoli dell'area Larsen A non includono la regione di Seal Nunataks.

Il ghiacciaio Pine Island (PIG) si trova nella baia del mare di Amundsen, dove le incursioni di calda circumpolar Deep Water (CDW) sulla piattaforma continentale hanno causato alti tassi di scioglimento basale (Dutrieux et al., 2014) e accelerato lo scarico di ghiaccio nell'oceano (Fig. 2b, S34; Studi precedenti hanno dimostrato che PIG ha sperimentato un ritiro a lungo termine della piattaforma di ghiaccio dagli anni '70 (Crabtree e Doake, 1982), dove l'incomterminaggio del ghiaccio a terra ha causato una grande perdita negativa di dinamica del ghiaccio dal bacino negli ultimi 3 decenni (Mouginot et al., 2014). Nel 2011, si è verificata una spaccatura attraverso la piattaforma più nell'entroterra rispetto a quanto precedentemente registrato (dal 1947), causando un evento di parto nel 2013, in cui sono stati persi 689 km2 di ghiaccio. Dal 2009, i nostri risultati mostrano che PIG si è ritirato di 1043 km2, ad un ritmo di -95 km2 anno−1. Altrove nell'Antartide occidentale, la piattaforma di ghiaccio di Swinburne ha registrato un tasso relativamente uniforme di perdita di ghiaccio durante tutto il periodo di studio, con un totale di 185 km2 di ghiaccio persi ad un tasso medio di -17 km2 anno-1, perdendo il 20,4 % della sua area entro il 2019 (Fig. S27).

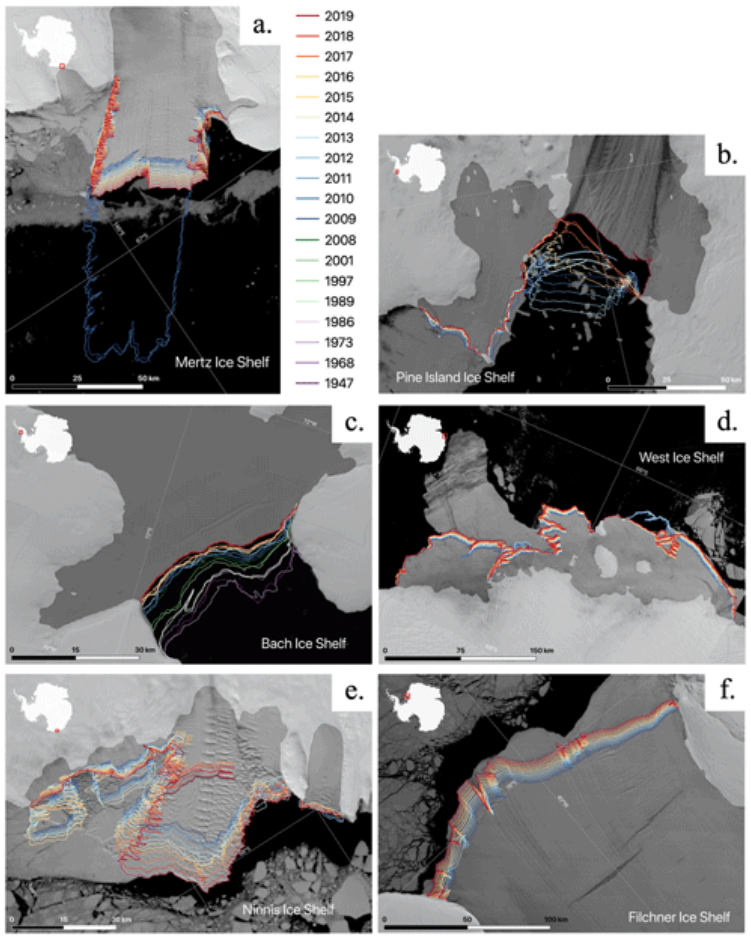


Figura 2Mappe del cambiamento del fronte del parto dal 1947 al 2019, che rappresenta **(a)** un importante evento di parto, **(b)** un rapido ritiro frontale del parto, **(c)** un graduale ritiro frontale del parto, **(d)** un avanzamento con ritiro periodico, **(e)** un rapido avanzamento frontale del parto e **(f)** un avanzamento frontale costante sul parto che sovrappone

3.3 Ritiro frontale graduale del parto

Definiamo il graduale ritiro frontale del parto come piattaforme di ghiaccio che hanno perso meno del 4 % della loro superficie totale nel periodo di studio di 11 anni (2009-2019), dove la percentuale massima di crescita annuale è dell'1,31 % e il ritiro massimo è del -3,76 %. Questa categoria è il più grande raggruppamento di piattaforme di ghiaccio contenenti otto posizioni in Antartide, tra cui le piattaforme di ghiaccio George VI, Bach e Stange nella penisola antartica, Sulzberger, Getz e Abbot nell'Antartide occidentale e le piattaforme di ghiaccio Totten e Baudouin nell'Antartide orientale (Fig. 3c).

La piattaforma di ghiaccio di George VI (GVI) è la più grande piattaforma di ghiaccio (22 882 km2 nel 2019) sulla costa occidentale della penisola antartica ed esiste come canale ghiacciato tra l'isola di Alexander e il continente (Fig. S5). GVI ha due fronti di ghiaccio a 500 km di distanza, con il fronte settentrionale e il fronte meridionale di fronte rispettivamente a Marguerite Bay e Belgica Trough. GVI sperimenta lo scioglimento stagionale della superficie nell'estate australe e alti tassi di fusione basale, che sono stati attribuiti all'acqua calda del bacino del Pacifico sud-orientale fornita dal CDW sotto lo scaffale (Lucchitta e Rosanova, 1998). Dal 1947 al 2008, GVI ha perso 1943,7 km2 di ghiaccio, mantenendo quindi il 92,4 % delle sue dimensioni del 1947 (fronti di ghiaccio forniti da Cook e Vaughan, 2010). Questa lenta ma costante perdita di ghiaccio è continuata dal 2009 al 2019 ad un tasso medio di 55 km2 anno^{-1}, con 601,9 km2 di ghiaccio persi durante il periodo di studio di 11 anni. Le piattaforme di ghiaccio di Bach e Stange si trovano su entrambi i lati dell'apertura meridionale del GVI e hanno anche mostrato tassi di ritiro lenti e costanti simili per molti decenni. Bach ha perso 304 km2 di ghiaccio in 62 anni dal 1947 al 2008 (fronti di ghiaccio forniti da Cook e Vaughan, 2010), con altri 113 km2 (2,5%) di ghiaccio persi negli 11 anni tra il 2009 e il 2019 (Fig. 2c, S8). Stange Ice Shelf ha mostrato un comportamento simile, mantenendo il 97 % della sua superficie di ghiaccio originariamente registrata tra il 1973 e il 2008 (una perdita di 272 km2) e perdendo un ulteriore 2,6 % della sua superficie (210 km2) nell'ultimo decennio (Fig. S9).

Le piattaforme di ghiaccio Getz e Abbot sono le più grandi piattaforme dell'Antartide occidentale, che fiancheggiano grandi porzioni della costa. Queste piattaforme di ghiaccio sono ancorate al loro fronte di parto da una serie di isole che limitano il tasso e la scala degli eventi di parto di iceberg. Mentre il ghiaccio a terra dell'entroterra della piattaforma di ghiaccio di Getz ha mostrato un'accelerazione dinamica del ghiaccio negli ultimi 20 anni (Selley et al., 2021), l'area della piattaforma di ghiaccio (33 605 km2 nel 2019) è rimasta relativamente stabile. Complessivamente, 403 km2 di ghiaccio sono stati persi dalla piattaforma di ghiaccio nell'ultimo decennio, con un tasso di ritiro frontale del parto di 17 km2 anno^{-1} nella parte occidentale (Fig. S29) e 20 km2 anno^{-1} sulla piattaforma orientale (Fig. S30). Durante il periodo di studio di 11 anni dal 2009 e dal 2019, entrambe le piattaforme di ghiaccio hanno perso una piccola quantità della loro superficie totale. Abbot Ice Shelf ha perso il 3,6 % della sua superficie totale (1141 km2), con alcuni periodi di crescita modesta nel 2014 e dal 2016 al 2019 (Fig. S35). La piattaforma di ghiaccio Sulzberger si trova nell'Antartide occidentale tra la piattaforma di ghiaccio di Swinburne e la penisola ospite di fronte al mare di Ross, con una superficie di 12 276 km2 nel 2019 (Fig. S28). Sulzberger ha una struttura complessa con numerose isole e punti di pinning che fiancheggiano il fronte glaciale, con ghiaccio che è spesso in media meno di 80 m al

suo capolinea e una profondità oceanica di ~150 m (Le Brocq et al., 2010). Le osservazioni satellitari indicano che non ci sono stati cambiamenti significativi della velocità dinamica del ghiaccio su questa piattaforma di ghiaccio negli ultimi 35 anni (Brunt et al., 2011); tuttavia, il modello di flusso di ghiaccio intorno agli 11 aumenti di ghiaccio (e rumples di ghiaccio più piccoli) ha creato linee di debolezza, che possono aumentare la probabilità di fratturazione del ghiaccio (Matsuoka et Nel 2011, un terremoto giapponese ha innescato uno tsunami che ha causato la formazione di spaccature sulla piattaforma di ghiaccio di Sulzberger. Ciò ha portato direttamente a un evento di parto di iceberg di 10 km× 6 km (Brunt et al., 2011) che ha ridotto l'area di Sulzberger di 142,1 km2. Tra il 2009 e il 2019, Sulzberger si è ritirato a un ritmo graduale di 19 km2 anni in totale, perdendo l'1,7% della sua superficie totale.

Nell'Antartide orientale, la piattaforma di ghiaccio di Baudouin si trova sulla costa settentrionale e ha subito una perdita di superficie complessiva di 239,4 km2 tra il 2011 e il 2019, con un ritiro medio di 27 km2 anno^{-1} (Fig. S15). TottenGlacier si trova anche nell'Antartide orientale e drena il grande bacino subglaciale dell'Aurora, che contiene abbastanza ghiaccio per aumentare il livello globale del mare di 3,5 m (Fig. S19; Greenbaum et al., 2015). Il flusso di ghiaccio dal ghiacciaio Totten è il più grande in EAIS e il terzo più alto dietro Pine Island e Thwaites in Antartide (Roberts et al., 2018), e la geometria del letto profondamente radicata dei flussi di ghiaccio rende la regione suscettibile al ritiro della linea di messa a terra e all'instabilità della calotta glaciale marina (MISI Tra il 2009 e il 2019, i nostri risultati mostrano che la piattaforma di ghiaccio di Totten ha subito una perdita totale di ghiaccio di 153 km2 ad un tasso medio di -14 km2 anno−1. Entro la fine del periodo di studio nel 2019, la piattaforma di ghiaccio di Totten ha mantenuto il 97,5% della sua area del 2009.

3.4 Avanzare con ritiro periodico

Definiamo l'anticipo con la categoria di ritiro periodico come piattaforme di ghiaccio che non solo hanno affrontato una crescita complessiva di almeno lo 0,9 %, ma hanno anche singoli anni di ritiro nell'ultimo decennio (2009-2019) che vanno dal -0,02 % al -4.21 %. Dal 2009, questa categoria include la piattaforma di ghiaccio Dotson nell'Antartide occidentale e le piattaforme di ghiaccio dell'Università di Mosca e dell'Ovest e di Drygalski nell'Antartide orientale. Gli eventi di parto osservati nell'ultimo decennio su queste piattaforme di ghiaccio sono spesso di piccole dimensioni, con la ricrescita dell'area che si verifica negli anni successivi (Fig. 3d).

Dotson Ice Shelf aveva un'area di 5791 km2 nel 2009 e si trova nella baia di Amundsen Sea tra le più grandi piattaforme di ghiaccio Thwaites e Getz (Fig. S31). Negli ultimi 11 anni, l'area della piattaforma di ghiaccio di Dotson è cresciuta modestamente dello 0,9 % a 584,3 km2. Il flusso di ghiaccio dal ghiacciaio Kohler è l'input principale che guida questo avanzamento; tuttavia, nel 2016, si è verificato un piccolo evento di parto, causando la perdita di un totale di 51,8 km2 di ghiaccio. La successiva ricrescita dal 2017 al 2019 ha portato a un guadagno di area di 9,9 km2 nei 2 anni successivi. La piattaforma di ghiaccio occidentale ha una vasta area di 15 855 km2 nel 2009 e si trova lungo la costa dell'EAIS tra le piattaforme di ghiaccio Amery e Shackleton (Fig. 2d, S17). I nostri risultati hanno mostrato che, entro il 2019, l'area della piattaforma di ghiaccio era aumentata moderatamente del 3,1 % a 16 343 km2, con un piccolo evento di parto dell'iceberg nel 2013 che ha perso 667,7 km2 di ghiaccio. La piattaforma di ghiaccio dell'Università di Mosca ha vissuto 3 anni di ritiro frontale del parto nel 2010, 2015 e 2016, per un totale di 251,3 km2 di perdita di ghiaccio, ma l'Università di Mosca ha assistito a una crescita marginale complessiva di 131 km2 dal 2009 al 2019 (Fig. S20). La lingua di ghiaccio Drygalski lunga 88 km (2019) si trova sulla costa di Scott nell'Antartide orientale, adiacente alla piattaforma di ghiaccio di Nansen (Fig. S24). Questa lingua di ghiaccio ha un'area (2019) di 2384 km2, con flusso di ghiaccio fornito dal ghiacciaio David, che guida il suo tasso medio di avanzamento di 5 km2 anno−1. Tra il 2011 e il 2019, l'area della lingua di ghiaccio di Drygalski è cresciuta di 48 km2, con un piccolo evento di parto dell'iceberg che si è verificato nel 2011, e ha avuto un ulteriore ritiro nel 2012, 2014 e 2016. Sebbene relativamente piccola rispetto ai principali eventi di parto dell'iceberg, questa categoria di piattaforme di ghiaccio dimostra l'importanza di effettuare misurazioni annuali del fronte del parto per catturare con precisione la vera perdita di massa di ghiaccio attraverso eventi di parto.

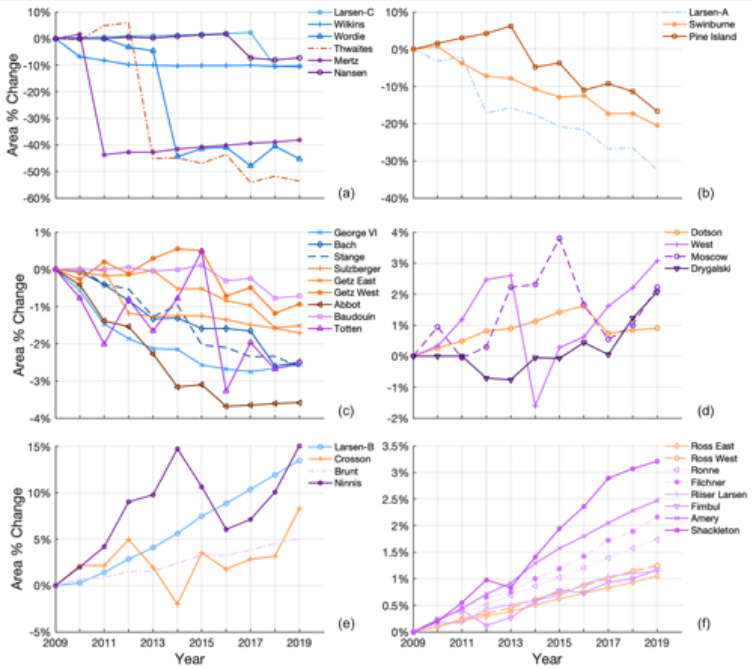


Figura 3Cambiamento percentuale dell'area dal 2009. **(a)** principali eventi di parto, **(b)** rapido ritiro frontale del parto, **(c)** graduale ritiro frontale del parto, **(d)** avanzamento con ritiro periodico, **(e)** rapido avanzamento frontale del parto e **(f)** avanzamento frontale costante del parto. Le piattaforme di ghiaccio della penisola antartica (AP) sono rappresentate in blu, le piattaforme di ghiaccio della calotta glaciale dell'Antartide occidentale (WAIS) sono rappresentate in arancione e le piattaforme di ghiaccio della calotta glaciale dell'Antartide orientale (EAIS) sono rappresentate in viola.

Scarica

3.5 Avanzamento frontale di parto rapido

Le piattaforme di ghiaccio che hanno subito un rapido avanzamento frontale di parto hanno aumentato le loro dimensioni di oltre il 5 % durante il periodo di studio di 11 anni (2009-2019), con una crescita massima di poco meno del 15 %. Come per la categoria di crescita graduale dell'area della piattaforma di ghiaccio, l'anticipo frontale del parto è controllato dal tasso di flusso di ghiaccio; tuttavia, le piattaforme di ghiaccio anteriori di parto rapido sono in media 10 volte più piccole (11 762 km2 anziché 141 684 km2). Pertanto l'avanzamento anteriore del parto rappresenta una percentuale maggiore del cambiamento di area totale. Le piattaforme di ghiaccio in questa categoria includono il residuo Larsen B che sta avanzando dopo che gran parte della piattaforma di ghiaccio è crollata nel marzo 2002 (Rack e Rott, 2004), oltre alle piattaforme di ghiaccio Ninnis e Brunt sulla calotta glaciale dell'Antartide orientale (EAIS) e alla piattaforma di ghiaccio Crosson lungo la calotta glaciale dell'A La piattaforma di ghiaccio Larsen B si trova sul lato nord-orientale della penisola antartica. Tra il 1963 e il 2009, la piattaforma di ghiaccio Larsen B ha perso l' 83,0 % (9055 km2) della sua superficie, con conseguente residuo di una piattaforma di ghiaccio di 1850 km2 nell'insenatura Scar nel 2009 (Fig. S3; fronti di ghiaccio forniti da Cook e Vaughan, 2010). La maggior parte di questa perdita di ghiaccio si è verificata durante un evento di collasso catastrofico nel 2002, dove l'idrofrattura della crevassa ha causato la perdita di 3250 km2 di ghiaccio in pochi giorni (Rack e Rott, 2004; Cook e Vaughan, 2010) a causa di un grande evento di parto tabulare originale che si è verificato nel 1995 (Kulessa Le osservazioni hanno dimostrato che la perdita di area dalla piattaforma di ghiaccio Larsen B ha portato alla sforcatura del ghiaccio a terra nella penisola antartica, con conseguente accelerazione di 8 volte del flusso di ghiaccio tra il 2000 e il 2003 e un corrispondente aumento del contributo del livello del mare da questa regione (Rignot et al., 2004). Nel periodo di 11 anni tra il 2009 e il 2019, il flusso di ghiaccio nella parte rimanente della piattaforma di ghiaccio Larsen B ha causato un rapido avanzamento frontale del parto a una velocità di 23 km2 anno$^{-1,}$ con un guadagno di superficie totale del 13,5 % (250 km2).

La piattaforma di ghiaccio di Ninnis si trova vicino alla linguetta del ghiacciaio Mertz sulla costa di George V dell'Antartide orientale ed è cresciuta di 268 km2 (15,1 %) dal 2009 (Fig. 2f e S22). La crescita della piattaforma di ghiaccio non era uniforme per tutta la portata della lingua di ghiaccio Ninnis, con un piccolo evento di parto che si è verificato nel 2017 sul suo lato orientale. La piattaforma di ghiaccio Brunt si trova a est delle piattaforme di ghiaccio di Ronne-Filcher a Dronning Maud Land, con il suo precedente evento storico di parto avvenuto 51 anni fa, nel 1971 (Anderson et al., 2014). Dal 2009 al 2019, la Brunt Ice Shelf è cresciuta di 1881 km2 in totale ad un tasso di 171 km2 anni^{-1} (Fig. S12). Nell'ultimo decennio, tre fratture principali sono diventate attive e sono cresciute sulla piattaforma Brunt Ice. Chasm 1 si trova sul lato occidentale della piattaforma di ghiaccio Brunt ed è rimasto dormiente per 35 anni; tuttavia, le osservazioni satellitari hanno mostrato che la crepa ha iniziato ad avanzare nel 2012. Chasm 1 si è propagato attraverso la piattaforma di ghiaccio ancora più rapidamente dal 2014 in poi, raggiungendo una lunghezza di 55 km entro il 2019. A partire dal 2021, un ponte di ghiaccio lungo ~5 km collega la punta di Chasm 1 con il McDonald Ice Rumples, un punto di pinning sulla Brunt Ice Shelf. Il 31 ottobre 2016, una seconda frattura chiamata Halloween Crack è stata osservata sulla piattaforma di ghiaccio Brunt. Misurando oltre 60 km di lunghezza, cresce nell'entroterra e lontano dai McDonald Ice Rumples. Nel novembre 2020, una terza fessura chiamata Northern Rift è stata identificata sul lato orientale dei rumples McDonald Ice. Questa fessura si è propagata rapidamente attraverso la piattaforma di ghiaccio e ha partottato un iceberg lungo 56 km e largo 33 km (A74) nel febbraio 2021, con una conseguente superficie totale di 38 175 km2 nel 2021. La piattaforma di Crosson Ice, situata adiacente alla piattaforma di ghiaccio Dotson e alimentata dal ghiacciaio Pope e dal ramo orientale del ghiacciaio Smith, ha subito un rapido avanzamento generale del parto dell'8,3 % (295 km2), con anni periodici di ritirata nel 2010, 2012, 2013 e 2015 (Fig. S32; Lilien et al., 2018).

3.6 Avanzamento frontale del parto costante

Definiamo l'avanzamento costante del parto frontale come piattaforme di ghiaccio che sono gradualmente cresciute nell'area dal 2009 al 2019, come controllato dal tasso di flusso del ghiaccio. Nel complesso, troviamo che le piattaforme di ghiaccio in questa categoria sono cresciute in media di poco meno del 4 % nel periodo di studio decennale, con un ritiro annuale limitato a un massimo dello 0,29 %, una crescita annuale che varia dallo 0 allo 0,58 % e una crescita media annua dello 0,18 %. Le piattaforme di ghiaccio in questa categoria includono le quattro più grandi piattaforme di ghiaccio dell'Antartide, tutte di oltre 100 000 km2 di area, che tendono a contenere alcuni dei ghiaccio galleggianti più spessi. Tutte e otto le piattaforme di ghiaccio di questa categoria si trovano nell'Antartide orientale e includono le piattaforme di ghiaccio Ross est e ovest e le piattaforme di ghiaccio di Ronne, Filchner, Riiser-Larsen, Fimbul, Amery e Shackleton (Fig. 3e).

Ross è la più grande piattaforma di ghiaccio dell'Antartide, che colma il divario tra la costa di Siple sulla calotta glaciale dell'Antartide occidentale e le montagne transantartiche a est. Nel decennio dal 2009 al 2019, sia le piattaforme di ghiaccio Ross east che Ross west sono cresciute costantemente di un totale di 5896 km2 a tassi di 187 e 350 km2 all'anno, rispettivamente (Fig. S25 e S26). Le regioni centrali della piattaforma di ghiaccio di Ross sperimentano un ispessimento periodico, che si pensa sia dovuto al congelamento del ghiaccio marino sulla base della piattaforma di ghiaccio durante l'inverno australe (Adusumilli et al., 2020; Hogg et al., 2021). Durante i mesi estivi più caldi, le osservazioni hanno dimostrato che si verifica un assottigliamento localizzato sul fronte di parto della piattaforma di ghiaccio orientale guidato dall'acqua superficiale antartica riscaldata atmosfericamente (Tinto et al., 2019). Il riscaldamento termico delle acque superficiali nel Mare di Ross si verifica quando forti venti al largo impediscono la formazione di ghiaccio marino, un processo che si verifica persistentemente nella polinya del Mare di Ross (Lazzara et al., 2008). Prima del 2009, le principali spaccature preesistenti hanno provocato significativi eventi di parto nel 1987 e nel 2008 (Lazzara et al., 2008), con periodi di costante ricrescita della piattaforma di ghiaccio nel mezzo. Le nostre osservazioni, combinate con quelle di studi precedenti (Smethie e Jacobs, 2005; Lazzara et al., 2008), suggeriscono che la piattaforma di ghiaccio di Ross esiste in un ciclo rigenerativo, dove più decenni di crescita si traducono in eventi periodici di parto di grandi dimensioni.

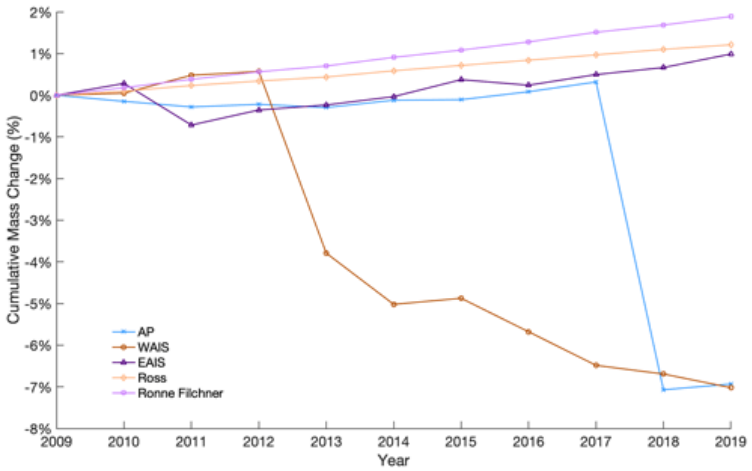


Figura 4Cambiamento della massa della piattaforma di ghiaccio cumulativa dal 2009 al 2019 per le piattaforme di ghiaccio AP, WAIS, EAIS, Ross Ice Shelf e Ronne-Filchner.

Scarica

Le piattaforme di ghiaccio di Ronne e Filchner si trovano sul lato opposto dell'Antartide, sfociando nel Mare di Weddell. Dal 2009 al 2019, l'area delle piattaforme di ghiaccio di Ronne e Filchner è aumentata rispettivamente di 5889 km2 (1,1%) e 2243 km2 (2,2 %; Fig. 2e), con tassi di crescita annui di 535 e 204 km2 anno^{-1} (Fig. S10 e S11). Prima del 2009, importanti eventi di parto si sono verificati sulla piattaforma di ghiaccio di Filchner nel 1986, dove è stata persa un'area totale di 11 500 km2, e nel 1998, quando un iceberg di 150 km × 35 km ha parto, riportando il fronte di calzataio della piattaforma di ghiaccio alla sua posizione del 1947 (Ferrigno e Gould, 1987). Prima di questi eventi di parto, grandi spaccature larghe 19 km sono cresciute parallelamente al fronte di ghiaccio dal 1957 in poi, illustrando il graduale accumulo a lungo termine agli eventi di parto (Swithinbank et al., 1988). Nel maggio 2021, la piattaforma di ghiaccio di Ronne ha partottato un iceberg dal suo bordo occidentale, con una superficie di 4 310 km2, con una superficie totale della piattaforma di ghiaccio di 341 957 km2.

Dal 2009, l'area delle piattaforme di ghiaccio Riiser-Larsen è cresciuta dell'1,1 %, da 43 544 km2 nel 2009 a 44 042 km2 nel 2019, con un tasso di crescita medio di 45 km2 anni (Fig. S13). Pochi eventi storici di parto sono stati segnalati sulle piattaforme di ghiaccio Riiser-Larsen. Ciò suggerisce che è rimasto in una configurazione relativamente stabile, con il ghiaccio che scorre più velocemente che alimenta la zona meridionale (73 a 74° S) e il ghiaccio che scorre più lentamente che alimenta il nord (72 a 73° S; Lange e Kohnen, 1985). La piattaforma di ghiaccio Fimbul si trova adiacente al Riiser-Larsen a Dronning Maud Land ed è cresciuta dell'1,2 % da 40 801 km2 nel 2009 e 41 277 km2 nel 2019 (Fig. S14). La regione centrale della piattaforma di ghiaccio di Fimbul è alimentata principalmente dal flusso di ghiaccio dal ghiacciaio Jutulstraumen, che scorre a velocità di circa 760 m anno^{-1} (Neckel et al., 2021). Il ghiacciaio Jutulstraumen divide la piattaforma di ghiaccio nella regione orientale a flusso rapido, che comprende la lingua di ghiaccio Trolltunga e il settore occidentale più lento (Humbert e Steinhage, 2011).

La piattaforma di ghiaccio di Amery si trova nell'Antartide orientale centrale ed è cresciuta costantemente di 1502 km2 dal 2009 al 2019. Prima del 2009, il più recente grande evento di parto di Amery si è verificato nel 1963/1964, dove sono stati persi circa 10 000 km2 di ghiaccio (Fricker et al., 2002). Al suo tasso medio di avanzamento del 2019 di 137 km2 anni^{-1}, ci vorrebbero altri 5-10 anni perché la posizione anteriore del parto tornasse alla sua posizione pre-calcotta del 1960, probabilmente indicando un ciclo di parto di circa 60-70 anni (Fricker et al., 2002). Le osservazioni satellitari hanno mostrato diverse spaccature prominenti e crescenti al centro del fronte del parto della piattaforma di ghiaccio, e negli ultimi 34+ anni, questa spaccatura si è allungata nell'entroterra e si è divisa in due rami separati causati dalla diffusione trasversale del ghiaccio (Fricker et al., 2002). All'inizio del 2019, il ramo settentrionale ha raggiunto una lunghezza totale di 35 km dalla spaccatura principale, mentre il ramo meridionale ha raggiunto i 25 km. Nel settembre 2019, il lato occidentale di questa frattura si è snoccitato, formando un iceberg largo 30 km e lungo 60 km (D-28), con questo evento di parto pensato per essere innescato da grandi cicloni polari gemelli che producono maree e venti aumentati (Fig. S16; Francis et al., 2021). Shackleton Ice Shelf, situata tra West Ice Shelf e Law Dome e una delle più grandi piattaforme di ghiaccio dell'Antartide orientale, ha registrato una crescita complessiva di 840,7 km2 dal 2009 al 2019 (Fig. S18).

3.7 Variazione complessiva dell'area della piattaforma di ghiaccio antartica

I nostri risultati mostrano che, negli 11 anni dal 2009 al 2019, le piattaforme di ghiaccio in Antartide hanno guadagnato un modesto 0,4 % (o 5305 km2) della loro superficie totale di ghiaccio (Tabella 1; Fig. 1). Questo guadagno di area è stato dominato da significativi guadagni significativi di 14 028 km2 (1,5%) di superficie della piattaforma di ghiaccio sulle due più grandi piattaforme di ghiaccio antartiche, Ronne-Filchner e Ross, e da un guadagno di superficie di 3532 km2 (1,3%) sulle piattaforme di ghiaccio dell'Antartide orientale. Ciò ha contrastato la grande riduzione della superficie della piattaforma di ghiaccio nella penisola antartica, dove è stato perso il 7,0 % (−6692,5 km2) di ghiaccio, e l'Antartide occidentale, dove le piattaforme di ghiaccio hanno perso il 5,5 % (−5563 km2) della loro superficie del 2009. Dal 2009 al 2019, le nostre osservazioni mostrano che il WAIS e la Penisola Antartica (AP) hanno registrato una perdita di massa cumulativa complessiva, mentre AP, Ross e Ronne-Filchner hanno visto una crescita cumulativa della massa di ghiaccio (Fig. 4). Le piattaforme di ghiaccio lungo la calotta glaciale dell'Antartide occidentale hanno perso 150,2 Gt anno^{-1} di massa di ghiaccio, con i singoli bacini di drenaggio tra cui Pine Island, Thwaites e Abbot che hanno contribuito alla maggior parte della perdita di ghiaccio. Nella penisola antartica, le piattaforme di ghiaccio hanno anche perso una massa totale di 104 Gt yr^{-1} nell'ultimo decennio, contribuendo in modo significativo all'apporto di acqua dolce nell'oceano. Ripiani più grandi come Ross, Ronne e Filchner, hanno guadagnato 262 Gt yr^{-1} di ghiaccio. Nell'Antartide orientale, Baudouin, Totten, Mertz e Nansen sono stati gli unici scaffali a perdere ghiaccio (−5, −4, −50 e −2 Gt yr^{-1}, rispettivamente); tuttavia, la regione nel suo complesso ha guadagnato 51 Gt yr−1

3.8 Flusso di parto allo stato stazionario

In assenza di una misurazione osservata della perdita di ghiaccio dal parto di iceberg, studi precedenti hanno utilizzato l'approssimazione del parto allo stato stazionario per stimare il volume di ghiaccio perso attraverso i processi di parto (Rignot et al., 2013; Depoorter et al., 2013). Questo metodo presuppone che tutto il flusso di ghiaccio attraverso una porta di flusso fissa, di solito situata vicino o all'ultima posizione anteriore di parto nota, venga perso attraverso il parto di iceberg (Rignot et al., 2013). Abbiamo calcolato il cambiamento di massa sia dai metodi di flusso di parto osservato che da quello stazionario per tutte le 34 piattaforme di ghiaccio in Antartide per valutare l'impatto della piena contabilità del cambiamento osservato nell'ultimo decennio (Tabella 1). Abbiamo calcolato la variazione della massa di ghiaccio utilizzando il flusso di parto osservato moltiplicando la differenza di area dal 2009 al 2019 per lo spessore medio del ghiaccio (Fretwell et al., 2013) al fronte di parto più interno e la densità del ghiaccio (ρ=0.9166 Gt km−3). Il cambiamento della massa di ghiaccio, utilizzando un'ipotesi allo stato stazionario, è stato stimato utilizzando un cancello di flusso situato nella posizione frontale di parto più interna osservato su ciascuna piattaforma di ghiaccio dal 2009, dove la velocità media del ghiaccio, la velocità del ghiaccio MEaSUREs a 450 m di risoluzione, viene estratta dalla posizione del cancello (Mouginot et al., 2019). Questo è moltiplicato per lo spessore medio del ghiaccio (Fretwell et al., 2013), la lunghezza del fronte di parto e la densità del ghiaccio (Rignot et al., 2013; Tabella S2). Abbiamo usato la posizione frontale di parto più interna quando abbiamo calcolato lo spessore e la velocità del ghiaccio per garantire che i frontali fossero all'interno della copertura spaziale dei set di dati di spessore e velocità. Per confrontare i diversi metodi, abbiamo calcolato la differenza tra i due numeri su tutte le piattaforme di ghiaccio all'interno dello studio. Abbiamo osservato una perdita di massa su 18 piattaforme di ghiaccio e un aumento di massa su 16. Nel complesso, l'ipotesi steady-state sovrastimerà la perdita di ghiaccio sulle piattaforme di ghiaccio che stanno avanzando e sottovaluterà la perdita di ghiaccio sulle piattaforme di ghiaccio che si stanno ritirando. L'ipotesi non vale bene anche per qualsiasi comportamento irregolare, come le piattaforme di ghiaccio che hanno perso ghiaccio a causa di grandi eventi di parto. Le nostre osservazioni mostrano che le piattaforme di ghiaccio antartiche hanno guadagnato 665,6 Gt di massa di ghiaccio dal 2009 al 2019, mentre l'approccio allo stato stazionario stimerebbe una perdita di ghiaccio di -20 028.1 Gt nello stesso periodo (Tabella 1). L'approssimazione del flusso di parto allo stato stazionario è più vicina alle osservazioni sulla penisola antartica; tuttavia, la quantità di perdita di ghiaccio è significativamente sovrastimata sia nell'Antartide occidentale che orientale e su tutte le grandi piattaforme di ghiaccio. Questi confronti sono in accordo con studi passati che confrontano i dati osservati con lo stato stazionario (Liu et al., 2015) e mostrano che le osservazioni variabili nel tempo del flusso di parto sono essenziali per quantificare con precisione i tempi e il volume del flusso di parto della piattaforma glaciale in Antartide.

4 Conclusioni

Questo studio ha generato un set di dati completo di cambiamenti nell'area della piattaforma di ghiaccio su 34 piattaforme di ghiaccio dell'Antartide nell'ultimo decennio. Complessivamente, le piattaforme di ghiaccio nella penisola antartica e nell'Antartide occidentale hanno perso aree di 6693 km2 e 5563 km2, rispettivamente, mentre le piattaforme di ghiaccio dell'Antartide orientale hanno guadagnato 3532 km2 di ghiaccio e le grandi piattaforme di ghiaccio di Ross, Ronne e Filchner sono cresciute di 14.028 km2 (totale Questo set di dati è un record ad alta risoluzione spaziale del cambiamento dal 2009 al 2019, che mostra le differenze regionali nel comportamento di parto della piattaforma di ghiaccio e documenta la frequenza e l'entità degli eventi di parto della piattaforma di ghiaccio in tutto il continente su scale temporali decenennale. Queste osservazioni saranno utili per gli studi regionali sul cambiamento della piattaforma di ghiaccio in Antartide e possono essere utilizzate come set di dati di input per gli studi di modellazione o come set di dati di convalida per studi futuri che sviluppano metodi più automatizzati per misurare il cambiamento nella posizione anteriore del parto della piattaforma di ghiaccio. Gli studi futuri dovrebbero utilizzare gli archivi di dati satellitari storici per estendere la registrazione del cambiamento dell'area della piattaforma di ghiaccio, il che ci permetterà di stabilire se c'è un cambiamento a lungo termine nella frequenza di parto della piattaforma di ghiaccio in Antartide. Dobbiamo sviluppare e applicare tecniche automatizzate per aumentare la frequenza con cui possono essere effettuate le misurazioni del fronte del parto, in particolare su piattaforme di ghiaccio e ghiacciai più piccoli, che consentiranno di caratterizzare e monitorare il comportamento di parto stagionale a breve termine.

Pdf by:
https://www.pro-memoria.info

Disponibilità dei dati

Le immagini satellitari MODIS sono disponibili presso il MODIS Antarctic ice shelf Image Archive (https://doi.org/10.7265/N5NC5Z4N; Scambos et al., 1996). I dati sullo spessore della piattaforma di ghiaccio e i dati sull'elevazione della superficie Bedmap2 sono disponibili su https://www.bas.ac.uk/project/bedmap-2/ e https://doi.org/10.5194/tc-7-375-2013 (Fretwell et al., 2013). I dati sulla velocità del ghiaccio dalla MEaSUREs InSAR-Based Antarctica Ice Velocity Map, versione 2, sono disponibili su https://doi.org/10.5067/IKBWW4RYHF1Q (Rignot et al., 2016). Le delineazioni della costa presentate in questo lavoro sono disponibili come shapefile .zip all'indirizzo https://doi.org/10.5281/zenodo.7830051 (Andreasen et al., 2023).

Supplemento

Il supplemento relativo a questo articolo è disponibile online all'indirizzo: https://doi.org/10.5194/tc-17-2059-2023-supplement.

Contributi dell'autore

JRA e AEH hanno pianificato la ricerca. JRA e HLS hanno eseguito le misurazioni. JRA e AEH hanno analizzato i dati, hanno scritto la bozza e hanno esaminato e modificato il documento.

Interessi concorrenti

L'autore del contatto ha dichiarato che nessuno degli autori ha interessi concorrenti.

Esclusione di responsabilità

Nota dell'editore: Copernicus Publications rimane neutrale per quanto riguarda le rivendicazioni giurisdizionali nelle mappe pubblicate e nelle affiliazioni istituzionali.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato condotto da Julia R. Andreasen presso il Dipartimento di suolo, acqua e clima dell'Università del Minnesota e la Scuola della Terra e dell'Ambiente dell'Università di Leeds. Julia R. Andreasen è stato sostenuto dal Future Investigators in NASA Earth and Space Science and Technology (FINESST) Award. Anna E. Hogg è stato sostenuto dal progetto DeCAdeS del Natural Environment Research Council (NERC) (sovvenzione n. NE/T012757/1) e il progetto ESA Polar+ Ice Shelves (sovvenzione n. ESA-IPL-POE-EF-cb-LE-2019-834). Gli autori ringraziano con gratitudine la National Aeronautics and Space Administration per aver acquisito i dati satellitari MODIS. Riconosciamo l'uso dei set di dati prodotti attraverso il programma MEaSUREs della NASA e siamo grati per il finanziamento dello sviluppo di record di dati climatici a lungo termine da osservazioni satellitari.

Sostegno finanziario

Questa ricerca è stata sostenuta dal Natural Environment Research Council (sovvenzione n. 118294).

Dichiarazione di revisione

Questo documento è stato curato da Nicolas Jourdain e recensito da Chad Greene e da un arbitro anonimo.

Pdf by:
https://www.pro-memoria.info

Riferimenti

Adusumilli, S., Fricker, H. A., Medley, B., Padman, L., e Siegfried, M. R.: Variazioni interannuali nell'apporto di acqua di fusione nell'Oceano Antartico dalle piattaforme di ghiaccio antartiche, Nat. Geosci., 13, 616–620,https://doi.org/10.1038/s41561-020-0616-z, 2020.

Anderson, R., Jones, D. H., e Gudmundsson, G. H.: Halley Research Station, Antartide: rischi di parto e strategie di monitoraggio, Nat. Pericolo Terra Syst. Sci., 14, 917–927, https://doi.org/10.5194/nhess-14-917-2014, 2014.

Andreasen, J. R., Hogg, A. E., e Selley, H. L.: Cambiamento nell'area della piattaforma di ghiaccio antartica dal 2009 al 2019, Zenodo [set di dati], https://doi.org/10.5281/zenodo.7830051, 2023.

Baumhoer, C., Dietz, A., Dech, S., e Kuenzer, C.: Remote Sensing of Antarctic Glacier and Ice-Shelf Front Dynamics–A Review, Remote Sens., 10, 1445, https://doi.org/10.3390/rs10091445, 2018.

Baumhoer, C. A., Dietz, A. J., Kneisel, C., e Kuenzer, C.: Estrazione automatizzata dei fronti del ghiacciaio antartico e della piattaforma di ghiaccio dalle immagini Sentinel-1 utilizzando Deep Learning, Remote Sens., 11, 2529,https://doi.org/10.3390/rs11212529, 2019.

Baumhoer, C. A., Dietz, A. J., Kneisel, C., Paeth, H., e Kuenzer, C.: Driver ambientali del ghiacciaio circum-Antartico e del ritiro frontale della piattaforma di ghiaccio negli ultimi due decenni, The Cryosphere, 15, 2357–2381,https://doi.org/10.5194/tc-15-2357-2021, 2021.

Brunt, K. M., Okal, E. A., e MacAyeal, D. R.: Calpremento della calotta del ghiaccio antartico innescato dal terremoto e dallo tsunami di Honshu (Giappone), J. Glaciol., 57, 785–788, https://doi.org/10.3189/002214311798043681, 2011.

Christie, F. D. W., Benham, T. J., Batchelor, C. L., Rack, W., Montelli, A. e Dowdeswell, J. A.: Avanzamento dello scaffale di ghiaccio antartico guidato da una circolazione atmosferica anomala e del ghiaccio marino, Nat. Geosci., 15, 356–362,https://doi.org/10.1038/s41561-022-00938-x, 2022.

Cuoco, A. J. e Vaughan, D. G.: Panoramica dei cambiamenti areali delle piattaforme di ghiaccio nella penisola antartica negli ultimi 50 anni, The Cryosphere, 4, 77-98, https://doi.org/10.5194/tc-4-77-2010, 2010.

Cuoco, A. J., Fox, A. J., Vaughan, D. G., e Ferrigno, J. G.: Fronti dei ghiacciai in ritirata sulla penisola antartica nel passato mezzo secolo, Science, 308, 541–544, https://doi.org/10.1126/science.1104235, 2005.

Crabtree, R. D. e Doake, C. S. M.: Pine Island Glacier e il suo bacino di drenaggio: risultati di Radio Echo-Sounding, Ann. Glaciol., 3, 65-70, https://doi.org/10.3189/S0260305500002548, 1982.

Depoorter, M. A., Bamber, J. L., Griggs, J. A., Lenaerts, J. T. M., Ligtenberg, S. R. M., van den Broeke, M. R., e Moholdt, G.: Flussi di calva e tassi di fusione basale delle piattaforme di ghiaccio antartiche, Nature, 502, 89-92,https://doi.org/10.1038/nature12567, 2013.

Dutrieux, P., Stewart, C., Jenkins, A., Nicholls, K. W., Corr, H. F. J., Rignot, E., e Steffen, K.: Terrazze basali su piattaforme di ghiaccio fuso, Geophys. Res. Lett., 41, 5506–5513, https://doi.org/10.1002/2014GL060618, 2014.

Dziak, R. P., Song Lee, W., Yun, S., Lee, C.-K., Haxel, J. H., Lau, T.-K., Matsumoto, H., Roche, L., e Tepp, G.: The 2016 Nansen Ice Shelf Calving Event: Hydroacoustic and Meteorological Observations of Ice Shelf Fracture and Iceberg Formation, 2018 OCEANS – MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean (OTO), Kobe, 1–7

Ferrigno, J. G. e Gould, W. G.: Cambiamenti sostanziali nella costa dell'Antartide rivelati dalle immagini satellitari, Polar Rec., 23, 577–583, https://doi.org/10.1017/S003224740000807X, 1987.

Francis, D., Mattingly, K. S., Lhermitte, S., Temimi, M. e Heil, P.: Gli estremi atmosferici hanno causato l'alto pendio della superficie del mare verso l'oceano innescando il più grande evento di parto in più di 50 anni alla piattaforma di ghiaccio di Amery, The Cryosphere, 15, 2147–2165, https://doi

Fretwell, P., Pritchard, H. D., Vaughan, D. G., Bamber, J. L., Barrand, N. E., Bell, R., Bianchi, C., Bingham, R. G., Blankenship, D. D., Casassa, G., Catania, G., Callens, D., Conway, H., Cook, A. J., Corr, H. F. J., Damaske, D., Damm, V., Ferraccioli, F., Forsberg, R., Fujita, S., Gim, Y., Gogineni, P., Griggs, J. A., Hindmarsh, R. C. A., Holmlund, P., Holt, J. W., Jacobel, R. W., Jenkins, A., Jokat, W., Jordan, T., King, E. C., Kohler, J., Krabill, W., Riger-Kusk, M., Langley, K. A., Leitchenkov, G., Leuschen, C., Luyendyk, B. P., Matsuoka, K., Mouginot, J., Nitsche, F. O., Nogi, Y.,

Nost, O. A., Popov, S. V., Rignot, E., Rippin, D. M., Rivera, A., Roberts, J., Ross, N., Siegert, M. J., Smith, A. M., Steinhage, D., Studinger, M., Sun, B., Tinto, B. K., Welch, B. C., Wilson, D., Young, D. A., Xiangbin, C., e Zirizzotti, A.: Bedmap2: set di dati migliorati di letto di ghiaccio, superficie e spessore per l'Antartide, The Cryosphere, 7, 375-393, https://doi.org/10.5194/tc-7-375-2013, 2013 (dati disponibili su: https://www.bas.

Fricker, H. A., Young, N. W., Allison, I., e Coleman, R.: parto da iceberg dalla piattaforma di ghiaccio di Amery, Antartide orientale, Ann. Glaciol., 34, 241–246, https://doi.org/10.3189/172756402781817581, 2002.

Fürst, J. J., Durand, G., Gillet-Chaulet, F., Tavard, L., Rankl, M., Braun, M. e Gagliardini, O.: La banda di sicurezza delle piattaforme di ghiaccio antartiche, Nat. Clim. Cambiamento, 6, 479–482, https://doi.org/10.1038/nclimate2912, 2016.

Greenbaum, J. S., Blankenship, D. D., Young, D. A., Richter, T. G., Roberts, J. L., Aitken, A. R. A., Legresy, B., Schroeder, D. M., Warner, R. C., van Ommen, T. D., e Siegert, M. J.: Accesso oceanico a una cavità sotto il ghiacciaio Totten nell'Antartide orientale, Nat. Geosci., 8, 294–298, https://doi.org/10.1038/ngeo2388, 2015.

Greene, C. A., Gardner, A. S., Schlegel, N.-J., e Fraser, A. D.: La perdita di parto antartico rivaleggia con il diradamento del ripiano del ghiaccio, Nature, 609, 948-953, https://doi.org/10.1038/s41586-022-05037-w, 2022.

Hogg, A. E. e Gudmundsson, G. H.: Impatti dell'evento di parto della piattaforma di ghiaccio Larsen-C, Nat. Clim. Cambiamento, 7, 540–542, https://doi.org/10.1038/nclimate3359, 2017.

Hogg, A. E., Gilbert, L., Shepherd, A., Muir, A. S. e McMillan, M.: Estendere il record del cambiamento dello spessore della piattaforma di ghiaccio antartica, dal 1992 al 2017, Adv. Space Res., 68, 724-731,https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.030, 2021.

Olanda, P. R., Brisbourne, A., Corr, H. F. J., McGrath, D., Purdon, K., Paden, J., Fricker, H. A., Paolo, F. S., e Fleming, A. H.: Forzatura oceanica e atmosferica di Larsen C Ice-Shelf thinning, The Cryosphere, 9, 1005-1024, https://doi.org/10.5194/tc-9-1005-2015, 2015.

Humbert, A. e Steinhage, D.: L'evoluzione dell'area della spaccatura occidentale della piattaforma di ghiaccio di Fimbul, Antartide, The Cryosphere, 5, 931–944, https://doi.org/10.5194/tc-5-931-2011, 2011.

Humbert, A., Gross, D., Müller, R., Braun, M., van de Wal, R. S. W., van den Broeke, M. R., Vaughan, D. G., e van de Berg, W. J.: Deformazione e guasto del ponte di ghiaccio sulla piattaforma di ghiaccio di Wilkins, Antartide, Ann.Glaciol., 51, 49-55, https://doi.org/10.3189/172756410791392709, 2010.

Jacobs, S. S., MacAyeal, D. R., e Ardai Jr., J. L.: Il recente avanzamento della piattaforma di ghiaccio Ross Antartide, J. Glaciol., 32, 464–474, https://doi.org/10.3189/S0022143000012181, 1986.

Joughin, I., Smith, B. E., e Medley, B.: Collasso della calotta glaciale marino potenzialmente in corso per il bacino del ghiacciaio Thwaites, Antartide occidentale, Science, 344, 735–738, https://doi.org/10.1126/science.1249055, 2014.

Chiavi, H. J. R., Jacobs, S. S., e Brigham, L. W.: Continua espansione verso nord della piattaforma di ghiaccio di Ross, Antartide, Ann. Glaciol., 27, 93-98, https://doi.org/10.3189/1998AoG27-1-93-98, 1998.

Kulessa, B., Jansen, D., Luckman, A. J., King, E. C., e Sammonds, P. R.: Il ghiaccio marino regola la stabilità futura di una grande piattaforma di ghiaccio antartica, Nat. Commun., 5, 3707, https://doi.org/10.1038/ncomms4707, 2014.

Lange, M. A. e Kohnen, H.: Fluttuazioni del fronte di ghiaccio nel mare di Weddell orientale e meridionale, Ann. Glaciol., 6, 187–191, https://doi.org/10.3189/1985AoG6-1-187-191, 1985.

Lazzara, M. A., Jezek, K. C., Scambos, T. A., MacAyeal, D. R., e Van Der Veen, C. J.: Sul recente parto di iceberg dalla piattaforma di ghiaccio di Ross, Geografia polare, 31, 15-26, https://doi.org/10.1080/10889370802175937, 2008.

Le Brocq, A. M., Payne, A. J., e Vieli, A.: Un set di dati antartico migliorato per modelli numerici di calotte glaciali ad alta risoluzione (ALBMAP v1), Earth Syst. Sci. Dati, 2, 247–260, https://doi.org/10.5194/essd-2-247-2010, 2010.

Li, T., Ding, Y., Zhao, T. e Cheng, X.: parto di iceberg dalla piattaforma di ghiaccio Antartica Nansen nell'aprile 2016 e il suo impatto locale, Sci. Bull., 61, 1157–1159, https://doi.org/10.1007/s11434-016-1124-9, 2016.

Lilien, D. A., Joughin, I., Smith, B., e Shean, D. E.: Cambiamenti nel flusso delle piattaforme di ghiaccio Crosson e Dotson, Antartide occidentale, in risposta all'elevata fusione, The Cryosphere, 12, 1415–1431,https://doi.org/10.5194/tc-12-1415-2018, 2018.

Liu, Y., Moore, J. C., Cheng, X., Gladstone, R. M., Bassis, J. N., Liu, H., Wen, J. e Hui, F.: Il diradamento guidato dall'oceano migliora il parto dell'iceberg e il ritiro delle piattaforme di ghiaccio antartiche, P. Natl. Acad. Sci. USA, 112, 3263-3268, https://doi.org/10.1073/pnas.1415137112, 2015.

Lucchitta, B. K. e Rosanova, C. E.: Ritiro dei margini settentrionali di George VI e Wilkins Ice Shelves, Penisola Antartica, Ann. Glaciol., 27, 41–46, https://doi.org/10.3189/1998AoG27-1-41-46, 1998.

MacGregor, J. A., Catania, G. A., Markowski, M. S. e Andrews, A. G.: Diffuso rifting e ritiro dei margini delle linfeggi nel mare orientale di Amundsen Embayment tra il 1972 e il 2011, J. Glaciol., 58, 458–466, https://doi.org/10.3189/2012JoG11J262, 2012.

Massom, R. A., Giles, A. B., Warner, R. C., Fricker, H. A., Legrésy, B., Hyland, G., Lescarmontier, L., e Young, N.: Influenze esterne sulla lingua del ghiacciaio Mertz (Antartide orientale) nel decennio che ha portato al suo parto nel 2010: fattori esterni influenzano la lingua del ghiacciaio, J. Geofisi. Res.-Earth, 120, 490–506,https://doi.org/10.1002/2014JF003223, 2015.

Matsuoka, K., Hindmarsh, R. C. A., Moholdt, G., Bentley, M. J., Pritchard, H. D., Brown, J., Conway, H., Drews, R., Durand, G., Goldberg, D., Hattermann, T., Kingslake, J., Lenaerts, J. T. M., Martín, C., Mulvaney, R., Nicholls, K. W., Pattyn, F., Ross, N., Scambos, T. e Whitehouse, P. L.: Il ghiaccio antartico si alza e si rumples: le loro proprietà e significato per la dinamica e l'evoluzione della calotta glaciale, Terra-Sci. Rev., 150, 724–745,https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.09.004, 2015.

Mouginot, J., Rignot, E., e Scheuchl, B.: Aumento sostenuto dello scarico di ghiaccio dall'Amundsen Sea Embayment, Antartide occidentale, dal 1973 al 2013, Geophys. Res. Lett., 41, 1576–1584,https://doi.org/10.1002/2013GL059069, 2014.

Neckel, N., Franke, S., Helm, V., Drews, R. e Jansen, D.: Prove del flusso d'acqua subglaciale a cascata al ghiacciaio Jutulstraumen (Antartide) Derivato dalle misurazioni Sentinel-1 e ICESat-2, Geophys. Res.Lett., 48, e2021GL094472, https://doi.org/10.1029/2021GL094472, 2021.

Padman, L., Costa, D. P., Dinniman, M. S., Fricker, H. A., Goebel, M. E., Huckstadt, L. A., Humbert, A., Joughin, I., Lenaerts, J. T. M., Ligtenberg, S. R. M., Scambos, T. e van den Broeke, M. R.: Controlli oceanici sul bilancio di massa della piattaforma di ghiaccio di Wilkins, Antartide, J. Geofisi. Res., 117, C01010,https://doi.org/10.1029/2011JC007301, 2012.

Rack, W. e Rott, H.: Modello di ritiro e disintegrazione della piattaforma di ghiaccio Larsen B, Penisola antartica, Ann. Glaciol., 39, 505–510, https://doi.org/10.3189/172756404781814005, 2004.

Rignot, E., Casassa, G., Gogineni, P., Krabill, W., Rivera, A., e Thomas, R.: Scarico accelerato di ghiaccio dalla Penisola Antartica dopo il crollo della piattaforma di ghiaccio Larsen B, Geophys. Res. Lett., 31, L18401,https://doi.org/10.1029/2004GL020697, 2004.

Rignot, E., Jacobs, S., Mouginot, J., e Scheuchl, B.: Ice-Shelf Melting Around Antarctica, Science, 341, 266–270, https://doi.org/10.1126/science.1235798, 2013.

Rignot, E., Mouginot, J., e Scheuchl, B.: MEaSUREs Antarctic Grounding Line from Differential Satellite Radar Interferometry, Versione 2, NSIDC-0484 [set di dati], https://doi.org/10.5067/IKBWW4RYHF1Q, 2016.

Roberts, J., Galton-Fenzi, B. K., Paolo, F. S., Donnelly, C., Gwyther, D. E., Padman, L., Young, D., Warner, R., Greenbaum, J., Fricker, H. A., Payne, A. J., Cornford, S., Le Brocq, A., van Ommen, T., Blankenship, D., andSiegert, M. J.: Variabilità forzata dell'oceano della perdita di massa del ghiacciaio Totten, Geological Society, Londra, Special Publications, 461, 175–186, https://doi.org/10.1144/SP461.6, 2018.

Rott, H., Skvarca, P., e Nagler, T.: Rapid Collapse of Northern Larsen Ice Shelf, Antarctica, Science, 271, 788–792, https://doi.org/10.1126/science.271.5250.788, 1996.

Scambos, T. A., Bohlander, J., e Raup, B.: Immagini di scaffali di ghiaccio antartici, Boulder, Colorado, USA, National Snow and Ice Data Center [set di dati], https://doi.org/10.7265/N5NC5Z4N, 1996.

Scambos, T. A., Hulbe, C., Fahnestock, M., e Bohlander, J.: Il legame tra il riscaldamento climatico e la rottura delle piattaforme di ghiaccio nella penisola antartica, J. Glaciol., 46, 516–530,https://doi.org/10.3189/172756500781833043, 2000.

Scambos, T. A., Bohlander, J. A., Shuman, C. A., e Skvarca, P.: Accelerazione e assottigliamento del ghiacciaio dopo il crollo della piattaforma di ghiaccio nella baia di Larsen B, Antartide, Geophys. Res. Lett., 31, L18402,https://doi.org/10.1029/2004GL020670, 2004.

Selley, H. L., Hogg, A. E., Cornford, S., Dutrieux, P., Shepherd, A., Wuite, J., Floricioiu, D., Kusk, A., Nagler, T., Gilbert, L., Slater, T. e Kim, T.-W.: Aumento diffuso dello squilibrio dinamico nella regione Getz dell'Antarti Commun., 12, 1133, https://doi.org/10.1038/s41467-021-21321-1, 2021.

Smethie, W. M. e Jacobs, S. S.: Circolazione e fusione sotto la piattaforma di ghiaccio di Ross: stime dall'evoluzione dei campi di CFC, salinità e temperatura nel Mare di Ross, Deep-Sea Res, Pt. I, 52, 959–978,https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.11.016, 2005.

Swithinbank, C., Brunk, K., e Sievers, J.: Una mappa glaciologica della piattaforma di ghiaccio Filchner-Ronne, Antartide, Ann. Glaciol., 11, 150–155, https://doi.org/10.3189/S0260305500006467, 1988.

Thomas, R. H., Sanderson, T. J. O., e Rose, K. E.: Effetto del riscaldamento climatico sulla calotta glaciale dell'Antartide occidentale, Nature, 277, 355-358, https://doi.org/10.1038/277355a0, 1979.

Tinto, K. J., Padman, L., Siddoway, C. S., Springer, S. R., Fricker, H. A., Das, I., Caratori Tontini, F., Porter, D. F., Frearson, N. P., Howard, S. L., Siegfried, M. R., Mosbeux, C., Becker, M. K., Bertinato, C., Boghosian, A., Brady, N., Burton, B. L., Chu, W., Cordero, S. I., Dhakal, T., Dong, L., Gustafson, C. D., Keeshin, S., Locke, C., Lockett, A., O'Brien, G., Spergel, J. J., Starke, S. E., Tankersley, M., Wearing, M. G., e Bell, R. E.: Risposta di Ross Ice Shelf al clima guidata dall'impronta tettonica sulla batimetria del fondo marino, Nat. Geosci., 12, 441–449, https://doi.org/10.1038/s41561-019-0370-2, 2019.

Trevers, M., Payne, A. J., Cornford, S. L., e Moon, T.: Le forze galleggianti promuovono il parto dell'iceberg del ghiacciaio dell'acqua di marea attraverso grandi concentrazioni di stress basale, The Cryosphere, 13, 1877–1887,https://doi.org/10.5194/tc-13-1877-2019, 2019.

Vaughan, D. G.: Implicazioni della rottura della piattaforma di ghiaccio Wordie, Antartide per il livello del mare, Antartic Science, 5, 403–408, https://doi.org/10.1017/S0954102093000537, 1993.

Wuite, J., Nagler, T., Gourmelen, N., Escorihuela, M. J., Hogg, A. E., e Drinkwater, M. R.: Sub-Annual Calving Front Migration, Area Change and Calving Rates from Swath Mode CryoSat-2 Altimetry, on Filchner-Ronne Ice Shelf, Antarctica, Remote Sens., 11, 2761, https://doi.org/10.3390/rs11232761, 2019.

Pdf by:
https://www.pro-memoria.info