

L'AUGMENT DEL NIVELL DE LA MAR

Quin és el paper de les glaceres i els mantells de gel?

FRANCISCO JOSÉ NAVARRO

El nivell de la mar ha augmentat a un ritme accelerat en les últimes dècades, i s'espera que continue augmentant considerablement al llarg del segle XXI i més enllà, principalment com a resultat de l'escalfament antropogènic. Una pujada substancial del nivell de la mar pot provocar efectes greus en les zones costaneres, com una major erosió del litoral i inundacions en zones habitades. Amb un escalfament global continuat, aquests impactes es veuran agreujats per esdeveniments meteorològics i d'onatge extrems, la qual cosa comporta greus riscos per a les comunitats humanes i els ecosistemes litorals. En aquest article repassem els avanços recents sobre la contribució de les glaceres i els mantells de gel a l'augment del nivell de la mar, tenint en compte l'informe especial de l'IPCC sobre l'oceà i la criosfera en un clima canviant.

Paraules clau: augment del nivell de la mar, glacera, mantell de gel, balanç de massa glacial, pèrdua de gel continental.

■ INTRODUCCIÓ

El nivell de la mar ha canviat molt en el passat, desenes de metres, en paral·lel amb els cicles glacials. Actualment, està augmentant a un ritme que s'ha accelerat en les últimes dècades, principalment com a resultat de l'escalfament antropogènic. Les zones litorals que no arriben als 10 metres sobre el nivell de la mar estan avui dia habitades per més de 680 milions de persones, que representen al voltant del 10% de la població mundial. Per tant, la pujada accelerada del nivell de la mar i les inundacions costaneres que s'hi associen, així com l'esperable augment de freqüència dels episodis marítics extrems, són motiu de preocupació per a la humanitat. En aquest article analitzem les taxes actuals i les estimacions futures sobre l'augment del nivell de la mar, i ens centrem especialment en la manera com hi contribueix la pèrdua de massa de les glaceres i els mantells de gel. Hi ha moltíssims estudis recents sobre aquesta qüestió. La publicació de l'informe especial sobre l'oceà i la criosfera en un clima canviant (SROCC, per les sigles en anglès) del Grup Intergover-

«El col·lapse de les plataformes de gel incrementa el trasllat de gel continental a l'oceà, la qual cosa contribueix indirectament a l'augment del nivell de la mar»

namental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (IPCC, 2019), i el seu resum per a responsables de polítiques (SPM), proporcionen dades i estimacions de consens, de manera que s'evitarà haver de citar una gran quantitat de fonts bibliogràfiques que ja es poden trobar fàcilment en l'informe. Per tant, l'esmentarem sovint, indicant el punt concret del resum i les seccions de l'informe complet en què es poden consultar més detalls i referències.

En el que segueix, quan presentem dades extretes d'estimacions estadístiques, indicarem la mediana i el rang de variació més probable (el valor central, 66%, o, en altres paraules, el rang 17-83% de la seua distribució de probabilitat), com es mostra en l'exemple següent: augment del nivell de la mar de 3,6 (3,1-4,1) mm/any.

■ TAXA ACTUAL D'AUGMENT DEL NIVELL DE LA MAR I CONTRIBUCIONS ACTUALS

La taxa mitjana mundial de l'augment del nivell de la mar en el període 2006-2015 ha estat de 3,6 (3,1-4,1) mm/any i mostra una clara acceleració en comparació amb

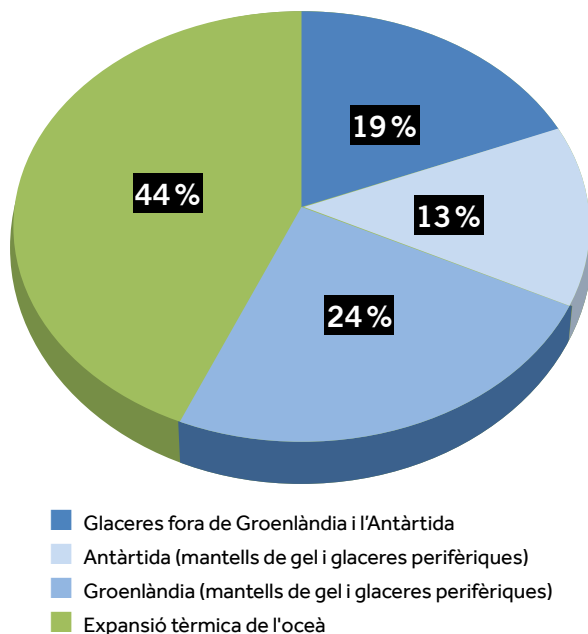


Figura 1. Percentatge de les contribucions positives al nivell global de la mar observades durant el període 2006-2015. L'emmagatzematge terrestre d'aigua no hi apareix perquè va ser negatiu durant aquest període (és a dir, va contribuir a reduir el nivell de la mar).

la taxa mitjana per al període 1901-1990, que va ser d'1,4 (0,8-2,0) mm/any. Com a conseqüència d'aquest augment continuat, el nivell mitjà de la mar ha augmentat un total de 0,16 (0,12-0,21) metres en el període 1902-2015. Aquest canvi es produeix a causa dels processos provocats per l'escalfament global, que, per al període entre 1850-1900 i 1986-2005, s'ha estimat en 0,63 (0,57-0,69) °C. Concretament, de l'augment actual del nivell de la mar de 3,6 mm/any, s'atribueixen a la pèrdua de glaceres i mantells de gel¹ 1,8 (1,7-1,9) mm/any, mentre que 1,4 (1,1-1,7) mm/any corresponen a l'expansió tèrmica de l'oceà (Figura 1). La contribució actual estimada dels canvis en l'emmagatzematge terrestre d'aigua (en la superfície o com a aigües subterrànies) és negativa, de -0,21 (-0,36-0,06) mm/any, és a dir, contribueix al descens del nivell de la mar. Tenint en compte els valors mitjans d'aquestes estimacions, observem que 0,6 (de 3,6, és a dir, un 17%) mm/any de l'augment observat del nivell de la mar continua sense tenir explicació, encara que aquesta discrepàn-

«El mantell de gel de Groenlàndia està perdent massa aproximadament el doble de ràpidament que el de l'Antàrtida»

cia es manté dins dels rangs d'incertesa (IPCC, 2019, SPM-A.3.1, §4.2.2).

En aquest estudi ens centrarem en la contribució de les glaceres i els mantells de gel, és a dir, de les masses de gel continentals. Notem que la pèrdua de gel marí no contribueix a l'augment del nivell de la mar, ja que la menor densitat del gel respecte a l'aigua és la raó que sure, com indica el principi d'Arquimedes. Per tant, quan el gel marí es fon, es converteix en aigua de nou i ocupa menys volum, exactament el de la part que estava submergida quan encara era gel. Per la mateixa raó, el desglaç de les llengües o les plataformes de gel flotants tampoc contribueix a l'augment del nivell de la mar. No obstant això, el col·lapse de les plataformes de gel sí que accelera el flux de les glaceres de descàrrega, per la qual cosa s'incrementa el transport de gel continental a l'oceà, la qual cosa contribueix indirectament a l'augment del nivell de la mar (Rott et al., 2018).

De la contribució d'1,8 mm/any a l'augment del nivell de la mar per part de les glaceres i els mantells de gel entre 2006-2015, 0,61 ($\pm 0,08$) mm/any corresponen a glaceres fora de Groenlàndia i l'Antàrtida; 0,77 ($\pm 0,03$) mm/any a Groenlàndia (al seu mantell de gel i glaceres perifèriques, desconnectats del mantell principal), i 0,43 ($\pm 0,05$) mm/any a l'Antàrtida (al seu mantell de

gel i glaceres perifèriques) (IPCC, 2019, SPM-A.1.1, §3.3 i §4.2.2).

La Figura 1 mostra els percentatges corresponents del total de contribucions positives observades. S'aprecia la gran contribució de les glaceres en comparació amb els mantells de gel, tenint en compte que el seu volum total és molt menor (el volum total de gel emmagatzemat en les glaceres, el

mantell de gel de Groenlàndia i el de l'Antàrtida és aproximadament equivalent a 0,5, 7 i 58 metres de canvi en el nivell de la mar, respectivament; és a dir, <1%, ~11% i >88%; IPCC, 2019). Això és degut al temps de resposta de les glaceres als canvis en el clima, molt més ràpid que el dels mantells de gel, pel fet que la seua grandària és considerablement menor.

Com podem observar, el mantell de gel de Groenlàndia està perdent massa aproximadament el doble de ràpidament que el de l'Antàrtida, encara que això podria canviar en els pròxims segles, com comentarem més endavant. La contribució de Groenlàndia a l'augment en el nivell de la mar en el període 2012-2016 va ser similar a la de 2002-2011, però molt major que la de 1992-2001, període en el qual la massa del mantell de gel es va mantenir quasi en equilibri. No obstant això, la contribució de l'Antàrtida en el període de 2012-2016 quasi va do-

¹ D'acord amb la pràctica comuna en la disciplina, distingirem entre glaceres (incloent-hi les glaceres i els casquets) i mantells de gel, referit únicament als mantells de gel de Groenlàndia i l'Antàrtida.

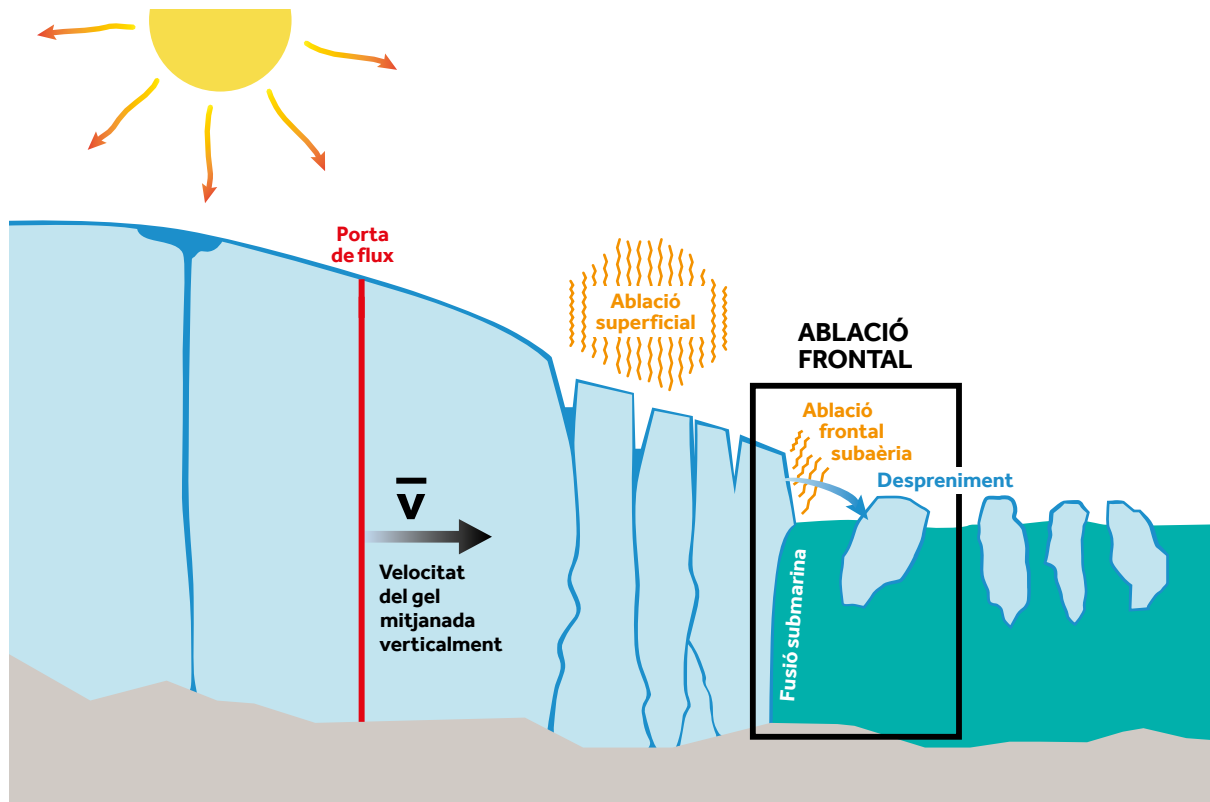


Figura 2. Il·lustració dels mecanismes típics de pèrdua de massa en el front d'una glacera amb terminació en mar no flotant. En el cas d'una llengua de glacera flotant o una plataforma de gel, també hi hauria fusió submarina sota la llengua o plataforma. L'ablació frontal inclou el despreniment d'icebergs i la fusió frontal submarina i subaèria. L'ablació superficial inclou la fusió en superfície (i l'escolament consegüent) i la sublimació.

FONT: Javier Lapazaran - Universidad Politécnica de Madrid

«Hi ha diversos mecanismes de pèrdua de massa de les glaceres i els mantells de gel, cadascun predominant en un entorn determinat»

blar la de 2002-2011, i va quadruplicar la de 1992-2001. Quant a les glaceres, la pèrdua de massa en el període 2006-2015 s'ha estimat un 9-10 % major que en el de 1993-2015, i un 33-37 % major que en el de 1970-2015. Els rangs percentuals depenen de si les estimacions es basen en observacions o en models calibrats amb observacions, i si aquests inclouen o exclouen les glaceres en la perifèria dels mantells de gel de Groenlàndia i l'Antàrtida (Bamber, Westaway, Marzeion i Wouters, 2018; Marzeion et al., 2017; Zemp et al., 2019).

■ MECANISMES FÍSICS DE LA PÈRDUA DE MASSA DE LES GLACERES CAP A L'OCEÀ

Hi ha diversos mecanismes de pèrdua de massa de les glaceres i els mantells de gel (Figura 2), cadascun predominant en un entorn determinat. El desglaç en la superfície i el posterior escolament cap a l'oceà és un d'aquests mecanismes per a totes les masses de gel continentals excepte les glaceres d'alta muntanya i el mantell de gel de l'Antàrtida, on la temperatura superficial és massa baixa per a fondre el gel, excepte a la península Antàrtica i en algunes àrees costaneres durant l'estiu. La sublimació és el mecanisme principal de pèrdua de massa en entorns molt freds en els quals la temperatura superficial raras vegades supera el punt de fusió, fins i tot a l'estiu. Malgrat que la sublimació és en realitat una pèrdua de massa cap

Escenari	Augment projectat del nivell de la mar (m)		Contribució de les glaceres i mantells de gel durant 2015-2100 (m)		
	2081-2100	2100	Glaceres	Mantell de Groenlàndia	Mantell de l'Antàrtida
RCP2.6	0,39 (0,26-0,53)	0,43 (0,29-0,59)	0,094 ± 0,025 22 %	0,07 (0,04-0,12) 16 %	0,04 (0,01-0,11) 9 %
RCP8.5	0,71 (0,51-0,92)	0,84 (0,61-1,10)	0,200 ± 0,044 24 %	0,15 (0,08-0,27) 18 %	0,12 (0,03-0,28) 14 %

Taula 1. Augment mitjà del nivell de la mar a escala mundial respecte a la mitjana per al període 1986-2005 en els escenaris d'emissions RCP 2.6 i 8.5; contribució de les glaceres i mantells de gel per al període 2015-2100 i percentatge de la seua contribució a l'augment mitjà del nivell de la mar a escala global en 2100 (IPCC, 2019, SPM-B.1.1, B.1.2 & B.3.1, §4.2.3).

a l'atmosfera, al final, en condensar-se i caure en forma de precipitacions, acaba alimentant l'oceà. Hem de tenir en compte que no tot el gel glacial que es fon en la superfície acaba en l'oceà. Una part important de la fusió en superfície, especialment la que es produeix en les zones d'acumulació de les glaceres i els mantells de gel, es filtra a través de la neu i la neu congelada² i es torna a congelar. A més, pot romandre durant l'hivern en forma d'aqüífers en la capa de neu congelada, com s'ha observat en certes zones d'acumulació al sud-est de Groenlàndia (Forster et al., 2013). A Groenlàndia en el seu conjunt, en el període de 1960-2014, només escapava a la mar aproximadament la meitat del material fos en superfície (Steger et al., 2017). Part de l'aigua líquida que ix de les glaceres pot fins i tot no arribar a l'oceà. Per exemple, en zones d'alta muntanya d'Àsia, una part de l'aigua fosa que abandona les glaceres s'absorbeix en la recàrrega d'aqüífers o s'utilitza en irrigació, especialment en conques sense drenatge a l'exterior (Brun, Berthier, Wagon, Käab, i Treichler, 2017).

Per a les glaceres i els mantells de gel que acaben en mar o en llac, el desprendiment d'icebergs i la fusió submarina en el front de la glacera i davall les llengües i les plataformes de gel flotants són altres mecanismes importants de pèrdua de massa, especialment a les regions polars. Encara que el desprendiment d'icebergs i la fusió submarina són mecanismes físicament diferents, en la pràctica resulta molt complicat estimar-ne les contribucions per separat. Per aquesta raó se'ls sol agrupar mitjançant el terme *descàrrega de gel*,³ que és molt més fàcil de mesurar (normalment, a través de l'ús de tècniques de teledetecció) calculant la massa que passa per portes

² *Neu congelada* es refereix al material en estats intermedis entre la neu i el gel. La neu que sobreviu almenys un hivern es converteix en neu congelada. La neu congelada es converteix en gel quan les bombolles d'aire entre els cristalls de gel es desconnecten entre si. Això ocorre a una pressió de ~840 kg m³.

³ Un terme relacionat és el de *flux de desprendiment d'icebergs*. Es refereix a la descàrrega de gel per una porta de flux pròxima al front glacial menys la diferència de massa resultant de l'avanç o reculada del front glacial.



NASA/Jeremy Harbeck 2016

La pèrdua de gel marí no contribueix a l'augment del nivell de la mar, ja que aquest sura a causa de la seua menor densitat respecte a l'aigua. Per tant, quan el gel marí es fon, es converteix en aigua de nou i ocupa menys volum, exactament el de la part que estava submergida quan encara era gel. Per la mateixa raó, el desglaç de les llengües o les plataformes de gel flotants tampoc contribueix a l'augment del nivell de la mar. No obstant això, la desintegració de les plataformes de gel sí que accelera el flux de les glaceres de descàrrega, per la qual cosa s'incrementa el transport de gel continental a l'oceà, fet que contribueix indirectament a l'augment del nivell de la mar. En la imatge, iceberg en procés de desprendre's de la plataforma de gel de Getz, en l'Antàrtida Occidental.

«Al llarg del segle XXI, l'expansió tèrmica oceànica i la pèrdua de massa de les glaceres i els mantells de gel continuaran sent les majors aportacions a l'augment del nivell de la mar»



de flux hipotètiques pròximes als fronts glacials, o en la línia d'ancoratge,⁴ en el cas de llengües o plataformes flotants. Aquest flux de massa es calcula com la velocitat de la glacera (sovint mesurada amb radars d'obertura sintètica o imatges òptiques de satèl·lit) multiplicat per la secció de la porta de flux (normalment calculada mitjançant tècniques de georadar) i multiplicat per la densitat del gel. Aquestes pèrdues depenen en gran manera de la velocitat de la glacera —de manera que l'acceleració del flux de la glacera provoca majors pèrdues— i tenen com a conseqüència l'aprimament de les zones de les quals es va sotraure el gel perdut. Per aquesta raó, aquestes pèrdues es coneixen també com a *aprimament dinàmic*.

La pèrdua de massa del mantell de gel de l'Antàrtida està en gran part dominada per l'aprimament dinàmic, que en les últimes dècades s'ha tornat especialment important en la part occidental del mantell (sobretot a la badia de la mar d'Amundsen) i a la regió de la península Antàrtica. En el primer cas, a causa d'un augment en la fusió sota el gel per l'arribada d'aigua profunda circum-polar relativament càlida (Jenkins et al., 2018) i, en el

«S'espera que el nivell mitjà del nivell de la mar augmente a un ritme accelerat durant el segle XXI i més endavant»

segon, per la desintegració de certes plataformes de gel i la consegüent reducció o pèrdua de l'efecte contrafort que exerceixen les plataformes sobre les glaceres de descàrrega que les alimenten (Reese, Gudmundsson, Levermann i Winkelmann, 2018). En el cas del mantell de gel de Groenlàndia, les pèrdues de massa en les últimes dècades s'han degut quasi en igual mesura a l'aprimament dinàmic i a la fusió en superfície i escollament subsegüent, però en els últims anys és aquesta darrera la que ha dominat, amb un 42 % de les pèrdues per al període de 2000-2005, 64 % per al de 2005-2009 i 68 % per al de 2009-2012 (Enderlin et al., 2014). En-

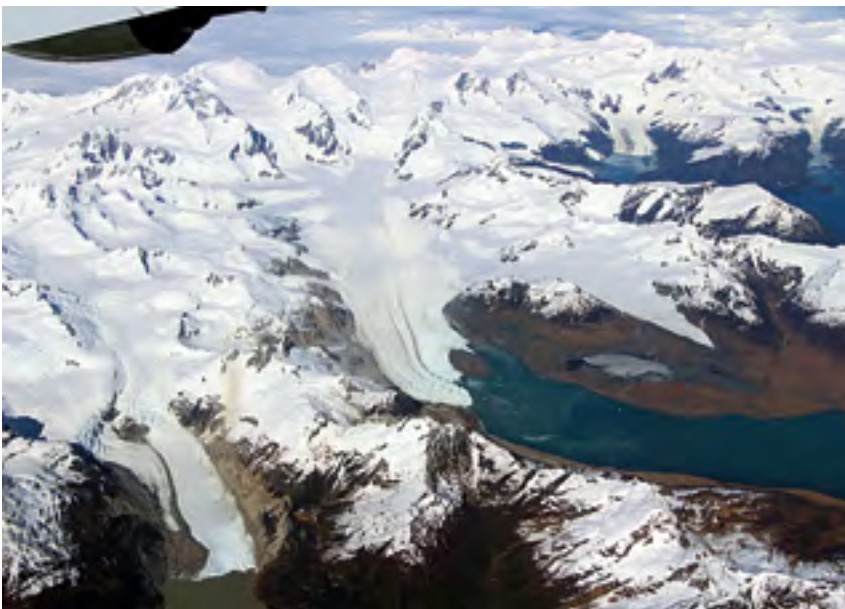
cara desconeixem molt sobre les causes de les incursions d'aigua càlida en la costa de Groenlàndia que provoquen la reculada de les glaceres i la resposta de les glaceres al forçament oceànic (Cowton, Sole, Nienow, Slater i Christoffersen, 2018; Straneo et al., 2013).

Encara que ens hem centrat en els mecanismes de pèrdua de massa, cal destacar que la contribució de les glaceres a l'augment del nivell de la mar és el resultat del balanç net entre guanys i pèrdues de massa, conegut com a *balanç de massa*. La principal font de massa per a les glaceres i els mantells de gel és, de fet, l'oceà, a través de l'evaporació, la condensació en els núvols i la precipitació en forma de neu sobre les masses de gel continentals. Sota un clima cada vegada més càlid, s'espera una major evaporació i precipitació en forma de neu en les zones polars i d'alta muntanya. De fet, a l'Antàrtida, l'acumulació de massa a causa de l'augment de les nevades ha compensat en part les pèrdues per aprimament dinàmic, en particular a la península Antàrtica (Medley i Thomas, 2018). A Groenlàndia, la disminució de l'oscil·lació de l'Atlàntic nord a l'estiu després dels anys noranta ha donat lloc a un clima anticiclònic, amb menys núvols i neu, i més insolació d'ona curta, la qual cosa explica la major part de l'augment de la fusió després de la dècada dels noranta (Hofer, Tedsone, Fettweis i Bamber, 2017).

■ PROJECCIONS D'AUGMENT DEL NIVELL DE LA MAR

En l'ús habitual de l'IPCC, el terme *projeccions* s'utilitza per a referir-se a prediccions sobre l'evolució futura en supòsits d'emissió de gasos d'efecte d'hivernacle. Des del *Cinquè informe d'avaluació* (AR5, en les seues sigles en anglès), publicat en 2014, s'utilitzen escenaris d'emissió,

⁴ La línia d'ancoratge és aquella en la qual un mantell de gel que arriba a la mar perd el contacte amb la terra i es converteix en una plataforma de gel flotant (o una llengua de gel, quan el que arriba a la mar és una glacera).



NASA/John Sonntag 2016

El temps de resposta de les glaceres als canvis en el clima és molt més ràpid que el dels mantells de gel, pel fet que la seua grandària és considerablement menor. En la imatge, muntanyes, glaceres, morenes i fiords del costat xilè de la Terra del Foc.

els denominats *supòsits de trajectòria de concentració representativa* (RCP, per les sigles en anglès de *representative concentration pathways*). S'etiqueten a partir de valors de forçament radiatiu⁵ associat l'any 2100 (originalment, eren 2,6; 4,5; 6 i 8,5 W/m²). Aquests escenaris d'emissió eren consistents amb certs supòsits socioeconòmics, però ara s'estan substituint per escenaris econòmics denominats *trajectòries socioeconòmiques compartides* (SSP per les sigles en anglès de *shared socioeconomic pathways*), amb l'objectiu de proporcionar descripcions flexibles de futurs possibles per a cada escenari d'emissió. Juntament amb les SSP, es van introduir nous escenaris d'emissió (1.9, 3.4 i 7). L'RCP1.9 és particularment interessant, perquè limita l'escalfament global per davall d'1,5 °C, l'objectiu de l'Acord de París. A continuació ens centrarem en l'RCP2.6 i l'RCP8.5, com a escenaris mínim i màxim, per a proporcionar un rang d'impactes possibles.

És important assenyalar que les projeccions que discutirem a continuació es basen en l'informe especial sobre l'oceà i la criosfera (IPCC, 2019), que utilitza noves estimacions respecte a les de l'AR5 només per a l'Antàrtida. Per a les glaceres i per a Groenlàndia, així com per a l'expansió tèrmica oceànica i l'emmagatzematge terrestre d'aigua, les projeccions són idèntiques a les de l'AR5. La raó principal d'això és la falta de simulacions climàtiques actualitzades del Projecte d'Intercomparació de Models de Clima Acoblats (o CMIP, sigles de Coupled Model Intercomparison Project) del Programa Mundial d'Investigacions Climàtiques, que proporciona informació sobre l'evolució del clima i els canvis associats en els oceans, glaceres i mantells de gel. Per a l'AR5 es van utilitzar resultats del CMIP5. No obstant això, encara no estan disponibles els resultats del CMIP6; s'espera que s'utilitzin per a la preparació del *Sisè informe d'avaluació* de l'IPCC (AR6). En el cas de l'Antàrtida, s'han realitzat diverses estimacions a escala continental de la pèrdua de gel en el futur des de la publicació de l'AR5, utilitzant diversos supòsits d'emissions. Fins i tot utilitzant resultats del CMIP5, aquests models han proporcionat informació probabilística sobre incerteses associades. Això ha permès realitzar una avaluació quantitativa de la incertesa relativa a les pèrdues dinàmiques de massa de tota l'Antàrtida, la qual cosa no era possible amb l'AR5. Per tant, les estimacions actualitzades per a la pèrdua de massa antàrtica s'han inclòs en l'IPCC (2019).

⁵ El *forçament radiatiu* és la diferència entre la radiació solar absorbida per la Terra i l'energia irradiada de tornada a l'espai.

L'augment mitjà del nivell de la mar a escala mundial previst fins a finals del segle XXI es mostra en la Taula 1. Les taxes associades per a 2100 són 4 (2-6) mm/any en RCP2.6 i 15 (10-20) mm/any en RCP8.5; és a dir, oscil·len entre pròximes al valor present i quatre vegades superiors (IPCC, 2019, SPM-B.3.3, §4.2.3). La Taula 1 també mostra les contribucions per part de les glaceres i els mantells de gel projectades a 2100. L'ampli rang d'incertesa a final de segle és degut principalment a la incertesa sobre les contribucions projectades dels mantells de gel, especialment de l'Antàrtida. Es pot observar que la contribució total de les glaceres a l'augment del nivell de la mar des de l'actualitat fins a finals del segle XXI continua sent important. No obstant això, es preveu que aquesta taxa de contribució durant aquest segle i d'ara en avant disminueixi en comparació amb la dels mantells de gel, a mesura que l'àrea i el volum de les glaceres disminueixi notablement i moltes desapareguen per complet, especialment en latituds i altituds baixes (Hanna et al., 2020; Hock et al., 2019). La pèrdua de gel de Groenlàndia durant el segle XXI estarà dominada per pèrdues de massa superficial, més que per la descàrrega dinàmica de gel cap a l'oceà, siga com siga

NASA/Brooke Mietley, 2016



NASA/John Sonntag, 2016

El mantell de gel de Groenlàndia està perdent massa aproximadament el doble de ràpid que el de l'Antàrtida, encara que això podria canviar en els segles vinents. En la imatge, extrem nord de la banquisa nord-occidental de la mar de Weddell, en l'oceà Antàrtic, on el gir de Weddell transporta el gel marí centenars de milles de sud a nord. Quan s'acosta a l'oceà obert, l'acció de les ones trenca el glaç en trossos menuts com els que s'hi mostren.



El despreniment d'icebergs i la fusió submarina en el front de la glacera i davall les llengües i les plataformes de gel flotants són mecanismes importants de pèrdua de massa de glaceres i mantells de gel, especialment a les regions polars. En la imatge, extrem nord de la plataforma de gel de Getz, alimentada per la glacera DeVicq, a l'Antàrtida. Pot observar-s'hi la fusió prop de la vora de la plataforma.



el supòsit d'emissió, mentre que la de l'Antàrtida estarà impulsada per l'aprimament dinàmic, provocat per la fusió submarina en la part inferior de les plataformes de gel i la consegüent pèrdua de l'efecte contrafort que les plataformes de gel exerceixen sobre les glaceres de descàrrega que les alimenten (IPCC, 2019, §4.2.3).

En el cas de l'Antàrtida, hi ha diversos possibles mecanismes d'inestabilitat dinàmica que requereixen atenció especial, ja que podrien accentuar les pèrdues de massa cap a finals de segle i més enllà, amb el ràpid i considerable augment del nivell de la mar que això comporta. Una gran part de l'Antàrtida, principalment en la part occidental i sobretot en la zona del mar d'Amundsen, descansa sobre terreny per sota del nivell de la mar i acaba principalment en l'oceà, per la qual cosa es coneix com a *mantell de gel marí*. Quan es troben confinades en badies o en contacte amb promontoris del fons marí, les plataformes de gel flotants exerceixen una pressió oposada a l'avanç cap a la mar del mantell de gel i contribueixen a la seua estabilitat. No obstant

això, actualment el mantell de gel es pot veure desestabilitzat per una combinació de forçaments oceànics (la fusió basal de les plataformes de gel que provoca el seu aprimament i reculada) i atmosfèrics (una major fusió en superfície que fa més profundes les clivelles en aquesta i que provoca hidrofracturació i, amb el temps, el col·lapse de la plataforma de gel). Si la línia d'ancoratge està en un llit rocós amb pendent cap a l'interior del mantell de gel, es pot produir una retroalimentació positiva que provoca un increment progressiu del flux de gel cap a l'oceà. Aquest fenomen es coneix com a *inestabilitat del mantell de gel marí* (MISI, per les sigles en anglès de *marine ice sheet instability*). Des de l'AR5, cada vegada hi ha més proves d'una reculada accelerada compatible amb la hipòtesi d'aquesta inestabilitat en algunes de les més importants glaceres de la zona de la mar d'Amundsen a l'Antàrtida occidental, incloent-hi les glaceres Thwaites i Illa Pine, i també a la glacera Totten, a la Terra de Wilkes, a l'Antàrtida Oriental. Aquesta reculada accelerada, però, no constitueix una prova definitiva

d'aquesta hipòtesi, per la qual cosa l'IPCC (2019, quadre general 8, §4.2.3.1.2) ho avalua amb un «nivell de confiança mitjà», pel que fa tant a la situació present com a la seua evolució futura.

Amb la desaparició de les plataformes de gel, es poden formar penya-segats de gel, que poden ser inestables si són prou alts per a produir tensions que excedisquen la resistència del gel. L'ensulsiada d'un penya-segat comportaria la reculada del mantell de gel. Aquest procés es coneix com a *inestabilitat dels penya-segats de gel marí* (MICI, *marine ice cliff instability*) i podria, potencialment, provocar el col·lapse parcial del mantell de gel de l'Antàrtida Occidental en els pròxims segles. No obstant això, les proves que confirmen l'existència d'aquesta inestabilitat dels penya-segats en el present o el passat són limitades, i hi ha poc consens respecte als seus mecanismes físics, per la qual cosa el seu potencial impacte futur és molt incert (IPCC, 2019, quadre general 8, §4.2.3.1.2).

L'IPCC (2019) també inclou projeccions per a escenaris a llarg termini, més enllà de l'any 2100, i utilitza resultats de models que apunten a un augment d'uns quants metres per a l'any 2300. Concretament, l'augment acumulat del nivell del mar projectat per a l'any 2300 és de 0,6-1,07 m per a l'escenari RCP2.6 i de 2,3-5,4 per a RCP8.5. Quant a la contribució de les glaceres i els mantells de gel, tots els estudis coincideixen que les glaceres tindran una importància limitada perquè, per a llavors, hauran perdut gran part de la

seua massa i moltes hauran desaparegut per complet. Quant a la contribució dels mantells de gel, hi ha grans discrepàncies entre els resultats dels diferents estudis, i molta incertesa sobre aquest tema. Això últim està relacionat principalment amb els efectes esperats de processos d'instabilitat dinàmica com la del mantell del gel marí i la dels penya-segats de gel marí (MISI i MICI, respectivament), que podrien comportar el col·lapse parcial del mantell de gel de l'Antàrtida Occidental. En conseqüència, aquests resultats són considerats per l'IPCC (2019) amb un «nivell de confiança baix». Es pot observar que també hi ha estudis que parlen d'un efecte estabilitzador de certs processos en el mantell i l'escorça terrestres, o el mateix mantell de gel, que contrarestarien la reculada. Aquests processos inclouen l'elevació viscoelàstica del llit de roca per la forta disminució de la massa de gel sobre aquest (el denominat *rebot isostàtic glacial*), i els efectes gravitatoris que redueixen la profunditat de l'aigua en la zona de la línia d'ancoratge. No obstant això, s'espera que els seus efectes en la reculada de la línia d'ancoratge siguin mínims fins a després de ~2250. A més, no se sap com es podrien veure afectats aquests resultats per la incertesa relativa a les variacions laterals de l'estructura de viscositat de la Terra sota el mantell de gel antàrtic. En conseqüència, s'espera que aquests possibles efectes estabilitzadors només frenen debilment l'augment del nivell de la mar durant el segle XXI, encara que podrien tornar-se més importants a escales temporals d'uns quants segles o fins i tot d'un mil·lenni (IPCC, 2019, §4.2.3.1.2 & §4.2.3.5).

A Groenlàndia, un escalfament superficial sostingut podria conduir, a llarg termini, a una reculada significativa (potser irreversible) del mantell de gel com a conseqüència de dos mecanismes de retroalimentació positiva. D'una banda, la realimentació entre balanç de massa en superfície i canvi d'elevació, que consisteix en un augment de la fusió en superfície a mesura que el mantell de gel evoluciona cap a altituds més baixes i més càlides, la qual cosa incrementa encara més l'ablació. D'una altra, la retroalimentació fusió-albedo, que augmenta la fusió per la major absorció de calor deguda a l'enfosquiment de la superfície de gel per la presència d'aigua líquida, la reducció de cobertura de neu (i l'augment de la superfície de gel nu) durant l'estiu i per processos biològics. No obstant això, la intensitat i duració de l'escalfament necessari per a provocar una reculada irreversible és molt incerta (IPCC, 2019, §4.2.3.5).



NASA/Jefferison Becht, 2018

Grans icebergs tabulars situats entre la plataforma de gel Larsen C de l'Antàrtida i l'iceberg A-68, que es va desprendre de Larsen C en 2017. La pèrdua de massa del mantell de gel de l'Antàrtida està en gran part dominada per l'aprimament dinàmic, que en les últimes dècades s'ha tornat especialment important en la part occidental del mantell (sobretot en la badia del mar d'Amundsen) i en la regió de la península Antàrtica.

«Els impactes previstos de l'augment del nivell de la mar inclouen l'erosió del litoral i les inundacions, que es veuran exacerbades per l'escalfament global»

■ OBSERVACIONS FINALS

Com hem vist, s'espera que el nivell mitjà del nivell de la mar augmente a un ritme accelerat durant el segle XXI i més endavant, i això provocarà impactes importants en les àrees litorals i insulars, llar de moltes comunitats humanes i d'una gran varietat d'ecosistemes. A més, l'augment del nivell de la mar no es distribueix de manera uniforme geogràficament i, en certes regions, s'hi uneix la disminució del nivell del terreny deguda a la sobreexplotació dels aqüífers, la qual cosa fa que aquestes zones siguin encara més propenses a patir impactes més importants. Els impactes previstos de l'augment del nivell de la mar inclouen l'erosió del litoral i les inundacions, que es veuran exacerbades per l'escalfament global, a causa d'onades de calor més intenses i episodis meteorològics extrems associats, així com a onatge d'al-



titud extrema. Tots aquests impactes i riscos associats els discuteix àmpliament l'IPCC (2019, capítols 4-9), que també estudia estratègies de mitigació i adaptació.

Al llarg del segle XXI, l'expansió tèrmica de l'oceà i la pèrdua de massa de les glaceres i els mantells de gel continuaran proporcionant les majors aportacions a l'augment del nivell de la mar. Acabat el segle, la progressiva absorció de calor per part de l'oceà contribuirà més a l'augment del nivell de la mar durant uns quants segles. La major incertesa respecte a escales de temps llargues és el paper dels mantells de gel. Sobre aquests, tots els models concorden que només els escenaris de baixes emissions com RCP2.6 podran evitar una pèrdua de gel substancial en el futur.

Els camins pels quals s'evolucione en el futur dependran en gran manera del fet que s'assolisquen o no determinats punts d'inflexió i, si s'assoleixen, del moment en què això ocorregui. Els dos punts d'inflexió més crítics són, primer, el lliurar en el qual la combinació de la realimentació del balanç de massa en superfície-elevació i la de la fusió-albedo podrien provocar una reculada irreversible del mantell de gel de Groenlàndia; i segon, els lliurats de fusió en superfície i submarina sota les plataformes de gel de l'Antàrtida Occidental, que podrien provocar una reculada irreversible del mantell de gel, per mitjà de processos d'instabilitat del mantell de gel marí (MISI) i, possiblement, dels penya-segats de gel marí (MICI). La possibilitat d'aconseguir aquests punts d'inflexió és, per descomptat, molt major en l'escenari d'emissions RCP8.5 que en RCP2.6. A escala temporal mil·lenària, els punts d'inflexió dels dos mantells de gel són iguals o una mica superiors a 1,5-2,0 °C (Pattyn et al., 2018). Per tant, l'RCP1.9 seria l'escenari ideal, perquè manté l'escalfament global per sota d'1,5 °C, com indica l'objectiu de l'Acord de París.

En conclusió, l'augment del nivell de la mar a escales temporals centenàries o mil·lenàries depèn de manera crítica del supòsit d'emissions considerat, la qual cosa remarca la importància de mitigar les emissions de gasos d'efecte d'hivernacle per a minimitzar els impactes i riscos associats amb aquest augment. ☺

REFERÈNCIES

- Bamber, J. L., Westaway, R. M., Marzeion, B., & Wouters, B. (2018). The land ice contribution to sea level during the satellite era. *Environmental Research Letters*, 13(6), 063008. doi: [10.1088/1748-9326/aac2f0](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac2f0)
- Brun, F., Berthier, E., Wagnon, P., Käab, A., & Treichler, D. (2017). A spatially resolved estimate of High-Mountain Asia glacier mass balances from 2000-2016. *Nature Geoscience*, 10, 668-673. doi: [10.1038/NGeo2999](https://doi.org/10.1038/NGeo2999)
- Cowton, T. R., Sole, A. J., Nienow, P. W., Slater, D. A., & Christoffersen, P. (2018). Linear response of east Greenland's tidewater glaciers to ocean/atmosphere warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(31), 7907-7912. doi: [10.1073/pnas.1801769115](https://doi.org/10.1073/pnas.1801769115)
- Enderlin, E. M., Howat, I. M., Jeong, S., Noh, M.-J., Van Angelen, J. H., & Van den Broeke, M. R. (2014). An improved mass budget for the Greenland ice sheet. *Geophysical Research Letters*, 41(3), 866-872. doi: [10.1002/2013GL059010](https://doi.org/10.1002/2013GL059010)

- Forster, R. R., Box, J. E., Van den Broeke, M. R., Miège, C., Burgess, E. W., Van Angelen, J. H., ... McConnell, J. R. (2013). Extensive liquid meltwater storage in firn within the Greenland ice sheet. *Nature Geoscience*, 7(2), 95-98. doi: [10.1038/ngeo2043](https://doi.org/10.1038/ngeo2043)
- Hanna, E., Pattyn, F., Navarro, F., Favier, V., Goelzer, H., Van den Broeke, M. R., ... Smith, B. (2020). Mass balance of the ice sheets and glaciers - Progress since AR5 and challenges. *Earth-Science Reviews*, 201, 102976. doi: [10.1016/j.earscirev.2019.102976](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102976)
- Hock, R., Bliss, A., Marzeion, B., Giesen, R., Hirabayashi, Y., Huss, M., ... Slangen, A. (2019). GlacierMIP - A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections. *Journal of Glaciology*, 65(251), 453-467. doi: [10.1017/jog.2019.22](https://doi.org/10.1017/jog.2019.22)
- Hofer, S., Tedstone, A. J., Fettweis, X., & Bamber, J. L. (2017). Decreasing cloud cover drives the recent mass loss on the Greenland Ice Sheet. *Science Advances*, 3(6), e1700584. doi: [10.1126/sciadv.1700584](https://doi.org/10.1126/sciadv.1700584)
- IPCC. (2019). *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*. H. - O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, ... N. M. Weyer (Eds.). En premsa. Consultat en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/SROCC_FullReport_FINAL.pdf
- Jenkins, A., Shoosmith, D., Dutrieux, P., Jacobs, S., Kim, T. W., Lee, S. H., ... Stammerjohn, S. (2018). West Antarctic Ice Sheet retreat in the Amundsen Sea driven by decadal oceanic variability. *Nature Geoscience*, 11(10), 733-738. doi: [10.1038/s41561-018-0207-4](https://doi.org/10.1038/s41561-018-0207-4)
- Marzeion, B., Champollion, N., Haeberli, W., Langley, K., Leclercq, P., & Paul, F. (2017). Observation-based estimates of global glacier mass change and its contribution to sea-level change. *Surveys in Geophysics*, 38(1), 105-130. doi: [10.1007/s10712-016-9394-y](https://doi.org/10.1007/s10712-016-9394-y)
- Medley, B., & Thomas, E. R. (2018). Increased snowfall over the Antarctic Ice Sheet mitigated twentieth-century sea-level rise. *Nature Climate Change*, 9(1), 34-39. doi: [10.1038/s41558-018-0356-x](https://doi.org/10.1038/s41558-018-0356-x)
- Pattyn, F., Ritz, C., Hanna, E., Asay-Davis, X., DeConto, R., Durand, G., ... Van den Broeke, M. (2018). The Greenland and Antarctic ice sheets under 1.5 °C global warming. *Nature Climate Change*, 8(12), 1053-1061. doi: [10.1038/s41558-018-0305-8](https://doi.org/10.1038/s41558-018-0305-8)
- Reese, R., Gudmundsson, G. H., Levermann, A., & Winkelmann, R. (2018). The far reach of ice-shelf thinning in Antarctica. *Nature Climate Change*, 8(1), 53-57. doi: [10.1038/s41558-017-0020-x](https://doi.org/10.1038/s41558-017-0020-x)
- Rott, H., Abdel Jaber, W., Wuite, J., Scheiblauer, S., Floricioiu, D., Van Wessem, J. M., ... Van den Broeke, M. R. (2018). Changing pattern of ice flow and mass balance for glaciers discharging into the Larsen A and B embayments, Antarctic Peninsula, 2011 to 2016. *The Cryosphere*, 12, 1273-1291. doi: [10.5194/tc-12-1273-2018](https://doi.org/10.5194/tc-12-1273-2018)
- Steger, C. R., Reijmer, C. H., Van den Broeke, M. R., Wever, N., Forster, R. R., Koenig, L. S., ... Noël, B. P. Y. (2017). Firn meltwater retention on the Greenland Ice Sheet: A model comparison. *Frontiers in Earth Science*, 5, 3. doi: [10.3389/feart.2017.00003](https://doi.org/10.3389/feart.2017.00003)
- Straneo, F., Heimbach, P., Sergienko, O., Hamilton, G., Catania, G., Griffies, S., ... Vieli, A. (2013). Challenges to understanding the dynamic response of Greenland's marine terminating glaciers to oceanic and atmospheric forcing. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(8), 1131-1144. doi: [10.1175/BAMS-D-12-00100.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00100.1)
- Zemp, M., Huss, M., Thibert, E., Eckert, N., McNabb, R., Huber, J., ... Cogley, J. G. (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 568(7752), 382-386. doi: [10.1038/s41586-019-1071-0](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0)

AGRAÏMENTS

Aquesta investigació va ser finançada pel programa d'innovació i desenvolupament Horitzó 2020 de la Unió Europea, sota el projecte núm. 727890, i el projecte CTM2017-84441-R del Pla Estatal d'I+D.

FRANCISCO JOSÉ NAVARRO. Doctor en Ciències Físiques (Geofísica) i catedràtic de Matemàtica Aplicada en la Universitat Politècnica de Madrid (Espanya), on lidera el Grup d'Investigació de Simulació Numèrica en Ciència i Enginyeria. La seua investigació se centra en la glaciologia, especialment en el balanç de massa de les glaceres, les aplicacions de georadar en glaciologia, el modelatge numèric de la dinàmica de les glaceres i la detecció remota de glaceres. Actualment és president de la International Glaciological Society. ✉ francisco.navarro@upm.es