

OCEANS

L'augment del nivell de la mar

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

14/12/2020

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.



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. / Foto: NASA/Jeremy Harbeck 2016

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

«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»

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).

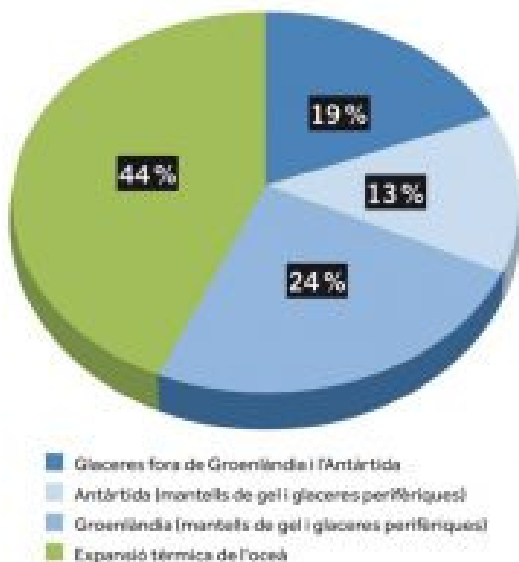


Figura 1. Percentatge de les contribucions positives al nivell global de la mar observades durant el període 2006-2015. L'emmagatzematge terrestre d'aigua no hi apareix perquè va ser negatiu durant aquest període (és a dir, va contribuir a reduir el nivell de la mar).

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 doblar 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 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 congelada 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, Wagnon, Kääb, i Treichler, 2017).

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

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 gel³, que és molt més fàcil de mesurar (normalment, a través de l'ús de tècniques de teledetecció) calculant la massa que passa per portes de flux hipotètiques pròximes als fronts glacials, o en la línia d'ancoratge⁴, 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.

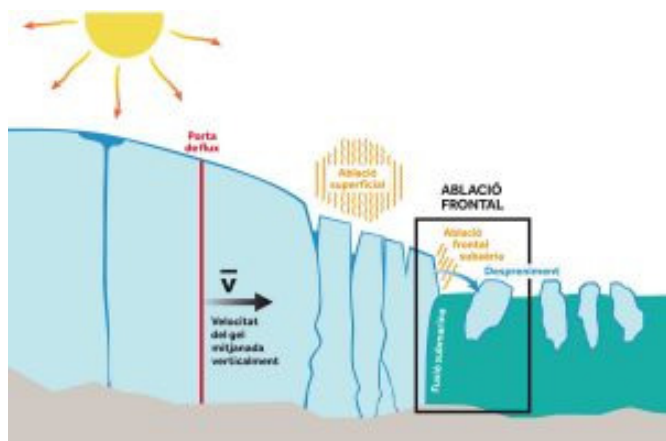
La pèrdua de massa del mantell de gel de l'Antàrtida està en gran part dominada per l'aprimament dinàmic, que en les últimes dècades s'ha tornat especialment important en la part occidental del mantell (sobretot a la badia de la mar d'Amundsen) i a la regió de la península Antàrtica. En el primer cas,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

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

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, Tedstone, Fettweis i Bamber, 2017).

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 desprendiment 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



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, 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 radiatiu 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.

«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»

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).

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 (0,61-1,01)	0,200 ± 0,044 24 %	0,15 (0,08-0,27) 18 %	0,12 (0,03-0,29) 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).

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 disminueixca en comparació amb la dels mantells de gel, a mesura que l'àrea i el volum de les glaceres disminueixca 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 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).

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

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

Ills 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, requadre 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.



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. / Foto: NASA/John Sonntag 2016

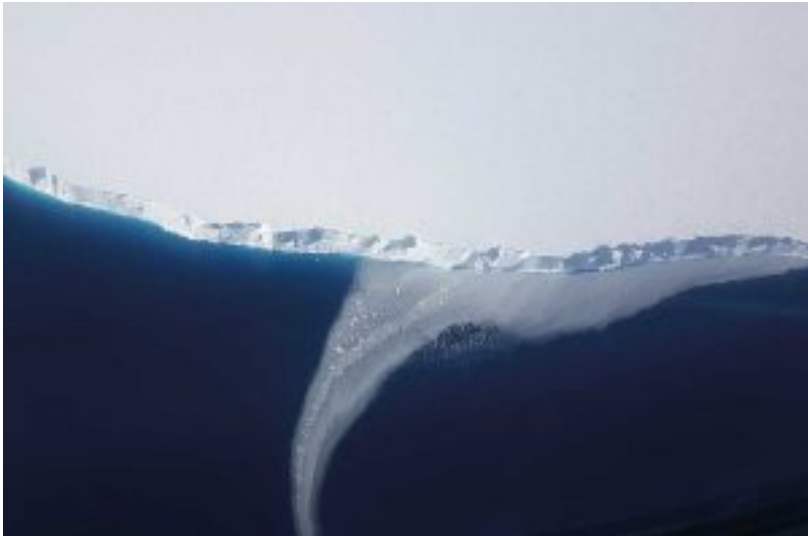
Amb la desaparició de les plataformes de gel, es poden formar penya-segats de gel, que poden ser inestables si són prou alts per a produir tensions que excedisquen la resistència del gel. L'ensulsiada d'un penya-segat comportaria la reculada del mantell de gel. Aquest procés es coneix com a inestabilitat 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, requadre general 8, §4.2.3.1.2).

«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»

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'inestabilitat 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 dèbilment 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).



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 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. / Foto: NASA/Brooke Medley 2016

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).

Observacions finals

Com hem vist, s'espera que el nivell mitjà del nivell de la mar augmenti 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'altitud 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 llinar 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 llinars 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'inestabilitat 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.

Notes al peu

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.
2. Neu congelat es refereix al material en estats intermedis entre la neu i el gel. La neu que sobreviu almenys un hivern es converteix en neu congelat. La neu congelat 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 despeniment 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.
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).
5. El forçament radiatiu és la diferència entre la radiació solar absorbida per la Terra i l'energia irradiada de tornada a l'espai.

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
- Brun, F., Berthier, E., Wagnon, P., Käbb, 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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
- Marzeion, B., Champollion, N., Haerberli, 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
- 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
- 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
- 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
- Rott, H., Abdel Jaber, W., Wuite, J., Scheiblaue, 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
- 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
- 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
- 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

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.

© Mètode 2020 - 107. Oceans - Volum 4 (2020)

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

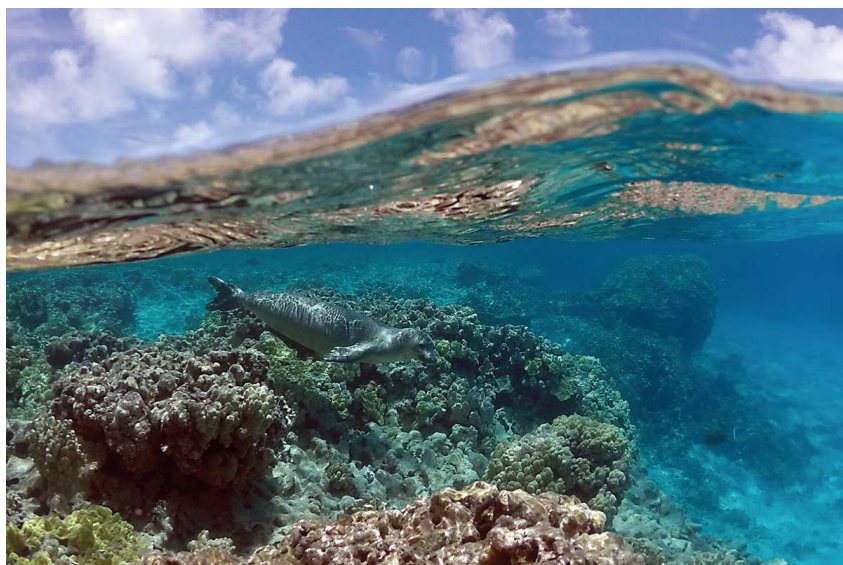
La contaminació invisible

Contaminants marins emergents

14/12/2020

Belén González Gaya

Des de l'antropocè, el planeta està amenaçat per una sèrie de riscos associats a l'activitat humana. Entre aquests, la contaminació química planteja desafiaments conceptuals i tècnics que fan especialment complexa la seua caracterització a escala global. Què és un contaminant? Quines propietats són rellevants per a definir-lo? Els estudis sobre l'abundància, la persistència, la mobilitat en el medi i el potencial de bioacumulació de compostos químics que usem diàriament estan canviant el paradigma d'allò que consideràvem un contaminant. Així, compostos que no generen toxicitat aguda poden ser perillosos per als ecosistemes si s'aporten de manera contínua al medi, es donen a elevadíssimes concentracions o es dispersen fàcilment. Donar visibilitat a aquesta contaminació oblidada que afecta els nostres oceans i que generem inconscientment és essencial per a protegir el planeta.



L'ésser humà és en l'actualitat el principal actor en la configuració dels ecosistemes en el nostre planeta. Entre els riscos associats a l'activitat humana, la contaminació química, invisible i difícil de quantificar, planteja reptes conceptuals i tècnics. / Imatge: NOAA/PIFSC/HMSRP

La rellevància de la contaminació desconeguda

Des del reconeixement de l'existència d'una nova era geològica, l'antropocè, en la qual l'ésser humà és el principal actor en la configuració dels ecosistemes en el nostre planeta, els riscos i modificacions a què hem sotmès la Terra s'han classificat de diverses maneres. El concepte de planet boundaries o límits planetaris proposat per Johan Rockström i col·laboradors (els impulsors de la mateixa teoria de l'antropocè) (Rockström et al., 2009) inclou nou grans problemes o compromisos ambientals la modificació dels quals per damunt d'un determinat nivell suposaria

un canvi ambiental abrupte i irreversible en els ecosistemes d'escala continental i fins i tot planetàries (Figura 1). Les amenaces identificades en aquesta teoria són 1) el canvi climàtic, 2) l'acidificació oceànica, 3) l'ozó troposfèric, 4) els cicles del nitrogen i del fòsfor, 5) l'ús d'aigua dolça superficial, 6) el canvi d'ús de sòls i, finalment, 7) la pèrdua de biodiversitat. A més, inclouen dos compromisos més, que no són actualment quantificables perquè, segons els autors, no se'n sap prou per a poder estimar un valor o mètode de caracterització que permetia establir-ne el límit per a mantenir l'estabilitat del planeta Terra. Curiosament, aquests dos últims problemes planetaris estan relacionats amb la contaminació: 8) la contaminació química i 9) la càrrega d'aerosol atmosfèric.



Figura 1. Estat actual dels nou límits ambientals, concepte que avalua les amenaces a determinats aspectes del planeta. En roig, els riscos que es troben més enllà de la zona d'incertesa i per tant indiquen un alt risc. En groc, aquells que es troben en la zona d'incertesa (risc creixent). En verd, aquells que estan actualment per davall del límit estipulat. I, finalment, en gris, aquells límits sense quantificar, que seria el cas de les noves entitats i dels aerosols atmosfèrics. / Font: Modificat de Steffen et al. (2015).

En paraules de Rockström i els seus col·laboradors, «no hi ha actualment un sistema global i agregat d'anàlisi de la contaminació química» (Steffen et al., 2015), i això dificulta tremendament no sols la identificació d'aquesta contaminació a gran escala sinó també l'avaluació a escala global. Si anem més enllà en una revisió de la seua teoria més recent, es manté la hipòtesi de la impossibilitat de quantificar i delimitar el concepte de càrrega atmosfèrica d'aerosols i, fins i tot, es modifica el concepte de contaminació química, que es veu rebatejat com a existència de noves entitats, la qual cosa el converteix, encara més, en un límit ben borrós i indefinit (Steffen et al., 2015). No podem definir què són els contaminants químics o aquestes «noves entitats» ni, per descomptat, establir els límits de la seua producció i presència, ja que tampoc sabem com mesurar-los a escala planetària. És a dir, no existeix avui dia una metodologia científica acceptada a escala global que ens permeta avaluar l'estat del nostre planeta quant a la contaminació química a què l'estem sotmetent.

Aquest desconeixement o conflicte en la seua caracterització és degut, en part, a la dificultat en la identificació conceptual de les entitats contaminants. Què és un contaminant i què no ho és? En l'imaginari col·lectiu, un contaminant químic es relaciona amb una substància tòxica o perillosa que és nociva per al medi ambient i els organismes que l'habiten, incloent-hi l'ésser humà, però aquest paradigma està canviant en l'esfera científica. L'ús i producció a gran escala d'infinat de substàncies que en principi no serien considerades com a contaminants fa que compostos d'ús comú com la cafeïna, un perfum o un edulcorant puguin posar en risc els ecosistemes més vulnerables. És a dir, compostos sense un aparent efecte nociu en el medi, simplement a causa de les altíssimes concentracions en les quals actualment s'estan trobant en l'aigua, aire o terra, per culpa d'un ús massiu o pel fet de donar-se en combinació amb altres centenars de substàncies, poden ser una amenaça per a la salut del planeta. És per això que la concepció clàssica de «contaminants» en el segle passat, en la qual s'identificaven com a substàncies prioritàries els plaguicides, els hidrocarburs o els metalls pesants, entre molts més, actualment s'ha modificat. Això ha provocat una obertura de mires en les llistes de «contaminants emergents», i els productes de toaleta i ús personal, els fàrmacs o els additius alimentaris, entre altres, han passat a ser compostos químics d'interès. No es tracta de productes sintètics nous, sinó de vells coneguts que ara comencem a veure com a perillosos una vegada la seua presència en el medi s'ha descontrolat. Potser el terme contaminants de preocupació emergent és el que millor defineix aquest canvi d'enfocament, ja que mostra la nova atenció que s'ha de prestar a aquells compostos que tradicionalment no han sigut monitorats o estudiats, que no es troben actualment regulats per la normativa i que se sospita del seu risc potencial per als ecosistemes ambientals i la salut humana per la seua abundància en el medi, si bé no tenen per què ser substàncies noves.

«No podem establir els límits de producció i presència dels contaminants químics, ja que no sabem com mesurar-los a escala planetària»

Les principals agències reguladores, com la Unió Europea o l'Agència de Protecció Ambiental dels Estats Units (EPA, per les seues sigles en anglès), han proposat en els últims anys llistes de candidats en què es recomana el monitoratge de certes substàncies comunes, entre les quals es troben hormones, fàrmacs, additius alimentaris i filtres ultraviolats. Aquests compostos d'ús comú comparteixen, a més, una particularitat química que afecta la seua distribució: són generalment més polars que els tòxics estudiats en el passat, és a dir, tenen una major afinitat per l'aigua. Això fa que es distribuïsquen més fàcilment a través dels sistemes aquàtics; així que, encara que tinguen menor tendència a acumular-se en els greixos dels organismes o siguen menys tòxics, tenen un potencial de dispersió molt alt en rius i oceans (ECHA, 2016; European Parliament, 2013, 2015, 2018; UNEP, 2017; US EPA, 2015).

Per això en els ecosistemes aquàtics és especialment necessari controlar-los, ja que aquests són particularment sensibles als abocaments urbans, industrials i agrícoles, amb concentracions importants d'aquestes substàncies a priori «poc perilloses» però amb aportacions contínues i directes que es distribueixen amb facilitat. I més encara si es té en compte que, en el cas d'existir, els tractaments de les estacions de depuració d'aigües residuals (EDAR) són molt poc efectius, ja que no estan dissenyats per a eliminar contaminants d'aquesta índole. Per tant, la normativa i l'interès científic davant aquesta situació de canvi global s'estan enfocant cada vegada més cap a contaminants polars (major afinitat per l'aigua), d'ús més comú i amb major potencial de mobilitat. Això indica que, encara que potser els noms dels contaminants concrets que plantegen un risc encara siguen desconeguts, s'està fent un esforç per investigar-ne la presència i les propietats que poden fer-los especialment perillosos, com el potencial de transport i el perfil d'ús.

Com mesurar allò desconegut? L'anàlisi no dirigida

En aquest moment de canvi global, en el qual la contaminació «encara per conèixer» està adquirint la rellevància que mereix, es plantegen, a més, una sèrie de qüestions tècniques quant a la quantificació de contaminants en mostres ambientals. En aquest sentit, estan cobrant especial rellevància les metodologies d'anàlisi mitjançant espectrometria de masses, que permeten una identificació a escala molecular de les substàncies que es troben en el medi ambient. A més, l'acoblament de l'espectrometria a la cromatografia de líquids i de gasos permet una separació dels compostos analitzats sobre la base de la seua polaritat o la seua volatilitat respectivament, la qual cosa simplifica la identificació molecular i en millora la sensibilitat.

«Compostos sense un aparent efecte nociu en el medi poden ser una amenaça per a la salut del planeta»

És a dir, cada vegada som capaços de descobrir més contaminants i els podem identificar a més baixes concentracions. Aquest tipus d'equips analítics han estat aplicats ja des de finals del segle passat a l'anàlisi dirigida de contaminants; se sabia el que es volia quantificar, i s'hi anava pel dret, utilitzant estàndards o patrons químics per a la confirmació i quantificació de les substàncies d'interès. En poques paraules, si es pretenia estudiar la presència d'un plaguicida com el DDT en zones remotes, com l'oceà obert o l'Antàrtida, es recollien mostres d'aigua en aquestes zones, s'analitzava mitjançant cromatografia de gasos i espectrometria de masses, es comparava la mostra amb un patró de DDT i, en cas d'identificar-se en la mostra, es quantificava quant de plaguicida hi havia.

Però, com quantificar alguna cosa, quan no sabem què estem buscant? Què podria estar contaminant el nostre oceà? Quines substàncies, dels milions que aboquem a les mars, estan precisament en una zona determinada? Quines les estan afectant? El canvi de paradigma requereix noves tècniques, sobretot d'analítiques i computacionals, per a l'anàlisi de sospitosos i l'anàlisi no dirigida. És a

dir, hi ha una demanda d'una tecnologia que ens permeta conèixer quins contaminants es troben en el medi sense que es faci una discriminació de les substàncies que es volen quantificar. Les dades empíriques generades amb aquestes tècniques representen un gran avanç científic, ja que eviten el biaix de monitorar només certs compostos químics preseleccionats amb major o menor criteri, a més de representar un estalvi en l'ús d'estàndards químics, ja que l'adquisició de patrons de cadascuna de les substàncies amb risc potencial en el medi seria per complet inabastable per a qualsevol laboratori d'investigació (Figura 2).

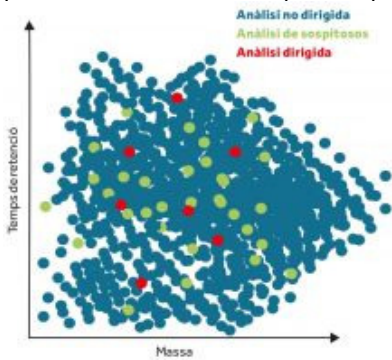


Figura 2. Representació de la infinitat de compostos que poden trobar-se en una mostra ambiental analitzada per cromatografia de líquids o de gasos i espectrometria de masses, ordenats en funció de la seua massa i el seu temps de retenció cromatogràfic (relacionat amb la seua polaritat en LC o volatilitat en GC) (unitats arbitràries). Aquestes tècniques eviten el biaix de monitorar només certs compostos químics preseleccionats amb major o menor criteri, com es pot observar en la imatge teòrica en comparar els resultats de l'anàlisi no dirigida amb els de l'anàlisi de sospitosos. / Font: Autora

L'anàlisi de sospitosos inclou certa preselecció dels contaminants que cal mesurar en l'aigua, aire, sediment o mostres biològiques, ja que parteix d'una llista preconcebuda de masses moleculars dels compostos que potencialment poden donar-se en aquesta mostra. En aquest sentit, estan configurant-se bases de dades específiques en certes matrius per a facilitar aquesta anàlisi; per exemple, compostos xenobiòtics en rius; drogues i substàncies d'abús en depuradores, o plaguicides bioacumulables en fauna silvestre. S'hi inclou no sols la massa, sinó també la fórmula molecular, el perfil isotòpic, l'estructura i la possible fragmentació (com es trencaria la molècula en cas de ser analitzada en un espectròmetre, característica intrínseca de cada substància), la qual cosa permet una identificació quasi inequívoca d'un contaminant en una mostra ambiental.

D'altra banda, l'anàlisi purament no dirigida no té cap llista, i per això les eines computacionals requerides són molt exigents perquè siguin capaces de processar els milions de substàncies que poden donar-se en una mostra ambiental i, al mateix temps, poder diferenciar aquelles que són naturals, sintètiques, perilloses o no, endògenes o exògenes i poder caracteritzar-les. Avui dia aquestes tècniques encara s'estan desenvolupant. De moment l'anàlisi de sospitosos continua sent la tècnica amb més acceptació científica i s'aplica en estudis amb llistes de candidats d'entre centenars a milers i desenes de milers de compostos.

De les nostres llars a l'oceà obert

Si bé és cert que les propietats químiques i la toxicitat potencial de la immensa quantitat de substàncies químiques que usem encara s'està caracteritzant, sí que és per tothom conegut que la font principal d'aquests contaminants és l'ésser humà (evidentment, ja que n'hi ha un alt percentatge de sintètics o derivats antropogènics de productes naturals). La contaminació es genera fonamentalment a les nostres indústries, a les nostres explotacions agrícoles i ramaderes, als nostres sistemes de producció d'energia i de transport... Però, i sobretot des de la nova acceptació dels contaminants d'interès emergent, també als nostres hospitals, cuines, banys i mobiliari domèstic. Deixant de banda els contaminants industrials i agrícoles més reconeguts, hi ha una gran quantitat de productes de consum que actualment estan en revisió pels possibles efectes que puguin tenir una vegada alliberats al medi aquàtic en grans quantitats o de manera continuada.

«Els ecosistemes aquàtics són particularment sensibles als abocaments urbans, industrials i agrícoles»

Algunes de les aplicacions dels contaminants més estudiats en la literatura científica actual són les que aporten alguna millora a la seguretat o a les propietats fisicoquímiques en béns de consum. Entre aquestes substàncies poden trobar-se retardants de flama, adhesius, impermeabilitzants, antiadherents, plastificants o termoestabilitzants, additius cosmètics i gelíficants, entre molts més. Són, en efecte, propietats necessàries per a un gran nombre de productes que utilitzem i considerem imprescindibles. Qui no vol que la seua catifa o el seu sofà estiguen protegits contra un possible incendi? O que les botes de muntanya i l'impermeable el resguarden de la pluja? Però la comunitat científica fa una crida a l'ús racional d'aquestes substàncies, a substituir-les en cas d'existir alternatives i, per descomptat, a l'adequada gestió i monitoratge dels seus possibles efectes en el medi.

Aquestes propietats tan pràctiques i desitjades en els productes de consum són les que precisament els fan generar riscos potencials una vegada són alliberades al medi ambient. D'una banda, la major part són substàncies sintètiques, la qual cosa vol dir que han estat creades per l'home sense que existiren anteriorment de manera natural, i, encara que siguin orgàniques (compostes per hidrogen i carboni en la major part), són difícilment degradables, ja que no existeixen organismes o comunitats bacterianes que puguin utilitzar-les de manera regular com a font de carboni. D'altra banda, moltes, a més, estan dissenyades precisament per a tindre aquesta durabilitat; per a protegir-nos de la pluja, per a evitar que els nostres aliments s'agafen a la paella en cuinar-los, o perquè protegissen del foc els nostres ordinadors i mòbils durant el major temps possible. És a dir, moltes estan creades per a ser recalcitrants.



Tortuga atrapada en el Mediterrani. / Imatge: Greenpeace / Marco Care

No obstant això, aquesta persistència dels contaminants d'interès emergent pot no donar-se sempre; per exemple, els productes farmacèutics o additius alimentaris sí que tenen temps de degradació més curts. Però cal recalcar que el fet que es produïsquen i que es consumisquen contínuament, ja que els usem de manera massiva en el dia a dia, fa que l'alliberament al medi i l'acumulació siguin inevitables. A això hem d'afegir, com s'ha comentat abans, que la química d'aquesta mena de compostos (polars o semipolars) afavoreix que la principal via de transport dels contaminants siga precisament l'aigua. Tenint en compte que més del 70 % de la

superfície terrestre és oceànica, el principal embornal de les substàncies químiques d'ús habitual i amb efectes desconeguts en els ecosistemes seran les mars.

És destacable, a més, que tant els neocontaminants agrícoles com els domèstics són recollits o acumulats en les aigües residuals. Els plaguicides i fertilitzants dels camps es llaven amb l'aigua de reg o de la pluja i s'acumulen en els aqüífers o s'uneixen a les aigües d'escolament que acaben en els llits fluvials. L'aigua d'escurar les nostres paelles antiadherents, els embalatges plàstics de menjar i de la roba waterproof, els edulcorants i medicaments que consumim i metabolitzem, els productes d'higiene personal i neteja... tots aquests elements es mesclen en les aigües residuals i arriben, en el millor dels casos, a depuradores que no són capaces de degradar-los abans de ser abocats als rius i mars, ja que, com s'ha comentat prèviament, no estan dissenyades per a això. És precisament en els tractaments d'aigües on la necessitat de monitoratge i d'eliminació podria ser més beneficiosa.

«En aquest moment de canvi global, es plantegen una sèrie de qüestions tècniques quant a la quantificació de contaminants en mostres ambientals»

Les principals regulacions comentades s'apliquen en aquest àmbit, i gran quantitat de treballs científics s'enfoquen actualment, emprant tècniques d'anàlisi de sospitosos i no dirigits, a la cerca específica d'aquells compostos que no es degraden en les estacions de tractament d'aigües i són sistemàticament alliberats. Les tecnologies que normalment s'apliquen en les plantes EDAR són les d'un tractament primari, en el qual per tècniques físiques se separen els sòlids i greixos, i un tractament secundari, en el qual bacteris (fangs actius, llits bacterians, biodiscos, etc.) efectuen un procés biològic mitjançant el qual s'elimina la major part de la matèria orgànica, però, evidentment, no els compostos resistents a la degradació bacteriana. Els tractaments terciaris (cloració, radiació amb ultraviolada, etc.) estan destinats fonamentalment a eliminar possibles patògens de les aigües, la qual cosa permet reutilitzar-les com a aigua de reg o de neteja urbana, per exemple, però no són tractaments específics per a la descontaminació química i a penes s'apliquen en el 27 % de les plantes d'Espanya, segons l'Asociación Española de Desalación y Reutilización (AEDyR, 2019). Per tant, aquells compostos sintètics més abundants tenen altes probabilitats de ser abocats al medi sense grans transformacions. Finalment, és comú l'abocament d'aigües depurades directament en zones costaneres; és el cas dels famosos emissaris a les nostres platges o alguns centenars de metres mar endins, que no fan sinó injectar directament en l'ecosistema marí totes aquestes substàncies «invisibles» i desconegudes, els efectes combinats de les quals encara no coneixem bé.

És il·lustratiu que cada vegada amb major freqüència els resultats de contaminants en estudis indoor (en ambients casolans, zones de treball, etc.) o en efluents d'EDAR coincideixen amb aquells reportats en els grans llacs del Canadà, en oceà obert o fins i tot en fauna de l'Antàrtida (Aznar-Aleman et al., 2019; Besis i Samara, 2012; Deblonde, Cossu-Leguille i Hartemann, 2011; Klečka, Persoon i Currie, 2010; Roscales, González-Solís, Zango, Ryan i Jiménez, 2016). La distribució d'aquests contaminants generats en ambients d'influència humana sembla no tenir límit, i, si no podem mesurar-ne l'alliberament al medi, les conseqüències poden ser realment desastroses per als ecosistemes globals.

Aprenent a evitar els pròxims desconeguts

Alguns contaminants són avui dia reconeguts per tots. L'exemple dels plàstics és clar (si bé el plàstic és un residu sòlid, no un contaminant químic, protagonistes d'aquest article); cada vegada hi ha més missatges públics per a rebutjar-los, reutilitzar-los, reciclar-los i fer-ne una deixalla correcta. D'altres potser no són tan coneguts, encara que la informació estiga disponible i hi haja certes campanyes públiques. El fet que no siguin «visibles», o que els seus efectes no siguin tan evidents i instantanis com l'ofegament d'una tortuga babaua amb una bossa, fa que els contaminants químics de preocupació emergent passen més desapercebuts davant el públic general. Com que la contaminació química no es pot percebre a simple vista, cosa que sí que succeeix amb residus sòlids com els plàstics, es requereixen unes eines informatives i legislatives més potents, que no sempre són tan efectives entre els consumidors com sol·liciten els científics especialistes.

«Hi ha una gran quantitat de productes de consum en revisió pels possibles efectes que poden tenir una vegada alliberats al medi aquàtic»

Un exemple de visibilització recent és el dels compostos perfluorats. Es tracta de substàncies que contenen fluor (el que les converteix en molt persistents) i les aplicacions de les quals inclouen aïllants en envasaments alimentaris; recobriment protector en mobiliari i automòbils, cosmètics, roba impermeable i accessoris de muntanya; adhesius i segelladors, escumes antiincendis, etc. En particular, el sulfonat de perfluorooctil (PFOS, abreujat en anglès) i les seues sals i l'àcid pentadecafluorooctanoic (PFOA) estan regulades pel conveni d'Estocolm des de 2009 i 2017, respectivament, per al cessament de la seua utilització en finalitats no imprescindibles. També va ser recomanat el monitoratge i cessament en la producció d'alguns d'aquests compostos per la Declaració de Madrid en 2015 (Blum et al., 2015), signada per centenars de científics, a causa de les evidències dels seus efectes tòxics, bioacumulatius i a la seua capacitat de transport a llarga distància. Si bé la producció als Estats Units i Europa ha cessat o està en procés de fer-ho, la fabricació en països com la Xina continua sustentant les aplicacions per a les quals avui dia no s'han trobat substituïts o per a les quals no hi ha voluntat política ni comercial de cessament, ja que els candidats són més costosos o el canvi exigiria certa adaptació industrial. Hi ha, no obstant això, conegudes marques de mobiliari, roba, equips de muntanya, cosmètica, electrodomèstics i estris de cuina, i altres productes que tradicionalment havien usat aquests compostos, que actualment han deixat d'aplicar-los i, afortunadament, els símbols «lliure de PFOA/PFOS» són cada vegada més habituals en el mercat. En qualsevol cas, ja han estat reportats en l'atmosfera, aigua, sediments i biota de zones remotes, com els oceans, l'Àrtic o l'Antàrtida, i tenint en compte la persistència de desenes i fins i tot centenars d'anys que presenten, continuaran sent perillosos allà on s'acumulen.

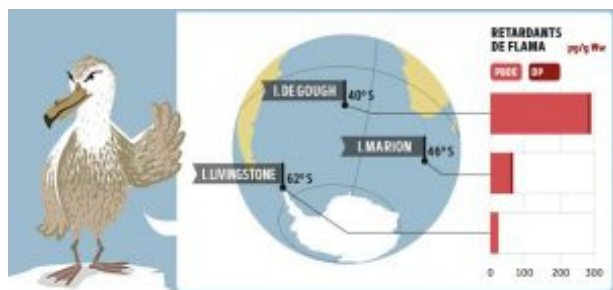


Figura 3. Nivells de retardants de flama (compostos bromats polibromodifenil èters o PBDE i Dechlorane Plus o DP) mesurats en poblacions de petrell gegant (*Macronectes* spp.) de l'Atlàntic sud, Índic sud i l'Antàrtida (Roscales et al., 2016). Aquests retardants són molt persistents en la naturalesa i han estat utilitzats àmpliament en mòbils, tauletes i ordinadors, per la qual cosa la correcta retirada i reciclatge d'aquests productes obsolets és fonamental per a evitar la dispersió d'aquests contaminants a llocs tan remots com les mars antàrtiques. / Font: Figura cedida per J. L. Roscales

Així mateix, entre els retardants de flama són especialment coneguts els compostos bromats polibromodifenil èters (PBDE, en les seues sigles en anglès). Igual com succeeix als perfluorats, el fet de comptar amb àtoms de brom (un altre element halogen) en l'estructura, fa que els seus enllaços moleculars siguin especialment difícils de trencar i per tant siguin molt persistents en la naturalesa. N'hi ha alguns (els BDE amb quatre, cinc, sis, set i deu broms en la seua estructura) que estan també recollits en el conveni d'Estocolm, en el qual es recomana substituir-los en polímers plàstics i tèxtils. Les seues aplicacions en productes electrònics generen gran preocupació mediambiental, a causa sobretot de la gran demanda de mòbils, tauletes i ordinadors personals que els utilitzen en els seus components. La correcta retirada i reciclatge dels productes electrònics obsolets és fonamental per a evitar la dispersió d'aquests contaminants, ja que la transmissió de PBDE a fauna i aigua ha estat documentada des d'abocadors incontrolats i zones urbanes fins a arribar, com a exemple, fins i tot a ocells pelàgics de zones molt remotes, en els organismes dels quals s'acumulen a través de les cadenes tròfiques marines (Figura 3). Afortunadament, algunes conegudes marques d'electrònica ja inclouen en les seues llistes de «no conté» aquesta família de tòxics, i a col·lació de la recent normativa, s'espera que aquest exemple es vagi incrementant.

Hi ha altres famílies de plastificants i modificadors de polímers que, pel seu ús en productes alimentaris, d'ús personal o per a bebès, han estat més coneguts pels usuaris. Entre aquests es troben el bisfenol, els ftalats o els compostos organofosforats. Per als dos primers grups en l'actualitat hi ha certes regulacions d'ús en productes per a bebès o joguets infantils, i cada vegada és més freqüent veure en botelles reutilitzables l'etiquetatge que indica que no en contenen entre els seus components. Així i tot, i igual com succeïa amb els compostos anteriors, hi ha estudis que en detecten en tota mena de matrius i ambients, com l'atmosfera àrtica més remota, en les aigües de l'Amazones i de l'oceà obert o en grans mamífers marins (Fu i Kawamura, 2010; Garcia-Garin et al., 2020; Schmidt et al., 2019; Xie et al., 2007).

«Els compostos sintètics més abundants tenen altes probabilitats de ser abocats al medi sense grans transformacions»

Encara que la llista seria interminable (o almenys amb un final encara desconegut, fins i tot per als científics més experts), els fàrmacs són un altre dels grans grups de substàncies de preocupació emergent que s'estudien actualment en els ecosistemes aquàtics i els efectes potencials dels quals són una incògnita. L'ús i abús de medicaments i drogues il·legals converteix els efluents de les EDAR en fonts de còctels químics amb efectes sinèrgics o antagònics abocats de manera directa en rius o en zones costaneres. Així, s'han detectat nivells d'antidepressius o d'hormones, capaces d'alterar la fauna salvatge de la zona, en espais protegits afectats per plantes EDAR urbanes, com la Reserva d'Urdaibai, patrimoni de la UNESCO a Biscaia (Mijangos et al., 2018; Ziarrusta et al., 2019) per esmentar un exemple pròxim. Pel que fa a això, és important ressaltar la finalitat de les substàncies neocontaminants. Hi ha compostos prescindibles o substituïbles que, si hi ha voluntat política i industrial, podrien desaparèixer dels nostres productes i, a poc a poc, dels ecosistemes més sensibles. Però el cas dels productes farmacèutics és diferent. Les seues aplicacions per a la protecció de la salut humana en primera instància són primordials, per la qual cosa, si bé ha de tendir-se a controlar-ne l'abús, l'automedicació i la degradabilitat, no es pot en cap cas deixar d'usar-ne. Sí que s'ha de lluitar llavors per gestionar-ne correctament els residus, a més de per la implantació d'una tecnologia adequada en els sistemes de tractament d'aigües que els elimine i retire abans de retornar les aigües a la naturalesa.

És, per tant, una missió conjunta del consumidor, els productors, l'administració a escala global (ja que la contaminació no entén de fronteres) i l'esfera científica, la que es requereix per a donar visibilitat, controlar i gestionar els contaminants de preocupació emergent. Perquè la contaminació invisible també és important.

Referències

- AEDyR. (2019). Cifras de reutilización de agua en España. Consultat el 2 d'abril de 2020 en <https://aedyr.com/cifras-reutilizacion-agua-espana/>
- Aznar-Alemany, Ò., Yang, X., Alonso, M. B., Costa, E. S., Torres, J. P. M., Malm, O., ... Eljarrat, E. (2019). Preliminary study of long-range transport of halogenated flame retardants using Antarctic marine mammals. *Science of the Total Environment*, 650, 1889–1897. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.287
- Besis, A., & Samara, C. (2012). Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in the indoor and outdoor environments – A review on occurrence and human exposure. *Environmental Pollution*, 169, 217–229. doi: 10.1016/j.envpol.2012.04.009
- Blum, A., Balan, S. A., Scheringer, M., Trier, X., Goldenman, G., Cousins, I. T., ... Weber, R. (2015). The Madrid Statement on poly – and perfluoroalkyl substances (PFASs). *Environmental Health Perspectives*, 123(5), A107–A111. doi: 10.1289/ehp.1509934
- Deblonde, T., Cossu-Leguille, C., & Hartemann, P. (2011). Emerging pollutants in wastewater: A review of the literature. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 214(6), 442–448. doi: 10.1016/j.ijheh.2011.08.002
- ECHA. (2016). Lista de sustancias candidatas extremadamente preocupantes en procedimiento de autorización. Consultat el 25 març de 2020 en <https://echa.europa.eu/es/candidate-list-table>
- European Parliament. (2013). Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council of 12 August 2013 amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy. Text with EEA relevance. Consultat el 19 de març de 2020 en <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32013L0039>
- European Parliament. (2015). Commission Implementing Decision (EU) 2015/495 of 20 March 2015 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council (notified under document C[2015] 1756). Text with EEA relevance. Consultat en http://data.europa.eu/eli/dec_impl/2015/495/oj

European Parliament. (2018). Commission Implementing Decision (EU) 2018/840 of 5 June 2018 establishing a watch list of substances for Union-wide monitoring in the field of water policy pursuant to Directive 2008/105/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Implementing Decision (EU) 2015/495 (notified under document C[2018] 3362). Consultat en http://data.europa.eu/eli/dec_impl/2018/840/oj

Fu, P., & Kawamura, K. (2010). Ubiquity of bisphenol A in the atmosphere. *Environmental Pollution*, 158(10), 3138–3143. doi: 10.1016/j.envpol.2010.06.040

Garcia-Garin, O., Sala, B., Aguilar, A., Vighi, M., Víkingsson, G. A., Chosson, V., ... Borrell, A. (2020). Organophosphate contaminants in North Atlantic fin whales. *Science of the Total Environment*, 721, 137768. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137768

Klečka, G., Persoon, C., & Currie, R. (2010). Chemicals of emerging concern in the Great Lakes Basin: An analysis of environmental exposures. In D. M. Whitacre (Ed.), *Reviews of environmental contamination and toxicology* Volume 207 (p. 1–93). Nova York, NY: Springer. doi: 10.1007/978-1-4419-6406-9_1

Mijangos, L., Ziarrusta, H., Ros, O., Kortazar, L., Fernández, L. A., Olivares, M., ... Etxebarria, N. (2018). Occurrence of emerging pollutants in estuaries of the Basque Country: Analysis of sources and distribution, and assessment of the environmental risk. *Water Research*, 147, 152–163. doi: 10.1016/j.watres.2018.09.033

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475. doi: 10.1038/461472a

Roscales, J. L., González-Solis, J., Zango, L., Ryan, P. G., & Jiménez, B. (2016). Latitudinal exposure to DDTs, HCB, PCBs, PBDEs and DP in giant petrels (*Macronectes* spp.) across the Southern Ocean. *Environmental Research*, 148, 285–294. doi: 10.1016/j.envres.2016.04.005

Schmidt, N., Fauvel, V., Ody, A., Castro-Jiménez, J., Jouanno, J., Changeux, T., ... Sempéré, R. (2019). The Amazon River: A major source of organic plastic additives to the tropical North Atlantic? *Environmental Science & Technology*, 53(13), 7513–7521. doi: 10.1021/acs.est.9b01585

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. doi: 10.1126/science.1259855

UNEP. (2017). The Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs). Consultat el 25 de març de 2020 en <http://www.pops.int/>

US EPA. (2015, 18 d'agost). Contaminants of emerging concern including pharmaceuticals and personal care products [reports and assessments]. Consultat el 19 de març de 2020 en <https://www.epa.gov/wqc/contaminants-emerging-concern-including-pharmaceuticals-and-personal-care-products>

Xie, Z., Ebinghaus, R., Temme, C., Lohmann, R., Caba, A., & Ruck, W. (2007). Occurrence and air-sea exchange of phthalates in the Arctic. *Environmental Science & Technology*, 41(13), 4555–4560. doi: 10.1021/es0630240

Ziarrusta, H., Ribbenstedt, A., Mijangos, L., Picart-Armada, S., Perera-Lluna, A., Prieto, A., ... Etxebarria, N. (2019). Amitriptyline at an environmentally relevant concentration alters the profile of metabolites beyond monoamines in gilt-head bream. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 38(5), 965–977. doi: 10.1002/etc.4381

© Mètode 2020 - 107. Oceans - Volum 4 (2020)

Belén González Gaya

Investigadora del Centre d'Investigació Experimental en Biologia Marina en l'Estació Marina de Plentzia (PiE-UPV/EHU) i en el Departament de Química Analítica de la Universitat del País Basc (UPV/EHU), Espanya. El seu interès se centra en la presència i efectes de contaminants orgànics en ecosistemes naturals i zones urbanes, amb especial interès en els ecosistemes aquàtics. Tot això des d'una perspectiva multidisciplinària combinant tècniques analítiques, ecotoxicològiques i biològiques per a dilucidar l'impacte de la contaminació en el medi ambient.

belen.gonzalez@ehu.es

Quant s'està escalfant el Mediterrani?

Trenta-cinc anys d'observacions des de satèl·lit

14/12/2020

María José López García

L'escalfament global del planeta afecta especialment oceans i mars. Al mar Mediterrani, els registres oceanogràfics i meteorològics presos in situ juntament amb les observacions més recents des de satèl·lit evidencien un escalfament global estimat entre 0,6 i 1 oC durant les tres últimes dècades. En aquest article presentem els resultats de l'anàlisi d'una sèrie de 35 anys d'imatges tèrmiques mensuals en les conques occidentals del Mediterrani. Les dades indiquen un avançament i intensificació de l'estació estival: els estius són més llargs i intensos i els mesos de juny i juliol registren les majors taxes d'escalfament, amb increments de 0,6 oC/dècada.



Les conseqüències de l'escalfament del Mediterrani en aspectes com la intensificació de processos atmosfèrics com les DANA (Depressions Aïllades en Nivells Alts) són objecte d'interès i investigació per part de la comunitat científica. En la imatge, conseqüències a Barcelona del temporal Glòria, que va afectar la costa mediterrània a principis de 2020. / Foto: Pere Prlpz-Wikimedia

El Mediterrani, un «oceà en miniatura»

El Mediterrani, una mar quasi tancada emmarcada per tres continents, constitueix un escenari singular. Ocupa solament el 0,7 % de la superfície oceànica mundial i el 0,3 % del volum d'aigua, però ha estat considerada per molts autors com un «oceà en miniatura», un laboratori perfecte per a estudiar patrons climàtics i hidrològics (Bethoux et al., 1999), ja que gran part dels fenòmens observats en els oceans es produeixen també al Mediterrani. La configuració de la seua conca, amb grans

contrastos topogràfics, i la seua posició intermèdia entre climes temperats i subtropicals fan d'aquesta mar un espai especialment sensible, per la qual cosa ha estat identificat com un dels punts calents (hotspot) del canvi climàtic.

«El mar Mediterrani és un espai especialment sensible, per la qual cosa ha estat identificat com un dels punts calents del canvi climàtic»

El Mediterrani es defineix com una «conca de concentració» on les pèrdues hídriques per evaporació (outputs) superen els guanys (inputs) procedents de la precipitació i les aportacions fluvials. Aquest dèficit es compensa per l'intercanvi d'aigües marines de diferent salinitat amb l'oceà Atlàntic, a través de l'estret de Gibraltar i, en menor mesura, amb la mar Negra a través del Bòsfor. Per Gibraltar es produeix una entrada en superfície d'aigua atlàntica de menor densitat que progressa cap a la conca oriental i que va modificant les seues característiques en la seua trajectòria; en profunditat, es produeix l'eixida d'aigua mediterrània més densa procedent de la part oriental de la conca.

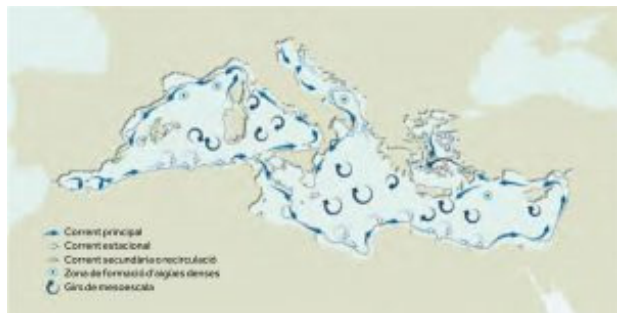


Figura 1. Esquema de la circulació superficial al Mediterrani (segons Millot i Taupier-Letage, 2005). La circulació general del Mediterrani s'origina per les diferències de densitat entre les diferents masses d'aigua. S'estructura en tres capes (superficial, intermèdia i profunda) i mostra un patró ciclònic entorn de les subconques occidental i oriental. / Font: UN Environmental Programme. GRID-Arendal.

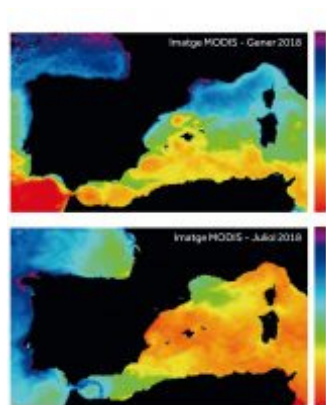
La circulació general, descrita des dels inicis del segle XX, revist un caràcter termohalí, això és, s'origina per les diferències de densitat entre les diferents masses d'aigua. S'estructura en tres capes (superficial, intermèdia i profunda) i mostra un patró ciclònic entorn de les subconques occidental i oriental (Figura 1). El Mediterrani és també un dels pocs llocs en latituds mitjanes on es produeix la formació d'aigua profunda, un procés fonamental d'oxigenació de les capes profundes que té lloc a l'hivern al golf de Lleó i al nord de l'Adriàtic. En dècades recents, l'esquema de circulació general inicialment descrit ha estat revisat i s'hi han incorporat trets de la circulació de mesoescala i elements de variabilitat interanual a la llum d'observacions i mesuraments cada vegada més extensos (Bergamasco i Malanotte-Rizzoli, 2010; Millot i Taupier-Letage, 2005).

«La pressió humana al Mediterrani s'ha produït sense tenir en compte que la mar és un sistema ambiental on interactuen múltiples factors»

En el balanç hidrològic de la conca, les aportacions fluvials constitueixen un factor rellevant. Solament sis conques hidrogràfiques superen una extensió de 50.000 km² (les del Nil, el Roine, l'Ebre, el Po, el Muluia i l'Evros) i quinze més, els 10.000 km²; la resta són petites i mitjanes amb un règim efímer i torrencial. Aquest caràcter torrencial dels rius, i el clima mediterrani caracteritzat per episodis de pluja de gran intensitat, produeixen amb freqüència crescudes i inundacions de gran impacte per a les societats humanes. En les últimes dècades s'ha constatat una disminució de les aportacions fluvials a la conca deguda a causes climàtiques, però fonamentalment antròpiques, per la construcció d'embassaments i l'increment del consum agrícola. La disminució en les aportacions fluvials s'apunta com un dels factors, entre altres, que explicaria l'increment recent de salinitat en les aigües profundes (García-Martínez, Vargas-Yáñez, Moya, Zunino i Bautista, 2018).

Els principals problemes mediambientals que identifiquem en la conca mediterrània guarden relació directa o indirecta amb la climatologia i la hidrologia de la mateixa conca: l'escassetat de recursos hídrics, la freqüència d'inundacions per la intensificació de precipitacions extremes, els processos d'erosió i degradació costanera, la contaminació de les aigües per abocaments urbans i industrials i els incendis forestals. La pressió humana a les riberes del Mediterrani –intensificada en dècades recents– s'ha produït sense tenir en compte que la mar Mediterrània és un sistema ambiental on interactuen múltiples factors; qualsevol alteració causa impactes en el funcionament global les conseqüències dels quals estem lluny d'avaluar.

Escalfament recent d'oceans i mars



En l'actualitat hi ha acord en la comunitat científica sobre l'escalfament del planeta atribuït a l'increment del CO₂ atmosfèric, especialment evident en les quatre últimes dècades. El Cinquè informe d'avaluació (AR5) del Grup Intergovernamental de Canvi Climàtic (IPCC, en les seues sigles en anglès) assenyala un escalfament global de 0,85 °C en el període 1889-2012 (IPCC, 2013). A escala planetària, s'ha estimat que entre 1970 i 2010 els oceans han acumulat més del 90 % de l'increment d'energia en el sistema climàtic. L'escalfament global és manifest en la capa superficial fins a 75 m, on s'ha calculat una taxa mitjana d'increment tèrmic de 0,11 °C/dècada.

Figura 2. Exemple d'imatge típica hivernal (gener de 2018) i estival (juliol de 2018) de la temperatura de les aigües del Mediterrani. A l'hivern s'observa un gradient latitudinal nord-sud (~4 °C) entre les aigües més fredes en la conca septentrional i més càlides en la d'Alborán. A l'estiu, la variabilitat espacial de la temperatura és major (~9 °C) i es registra un elevat escalfament en les conques centrals. La imatge mostra la zona d'estudi analitzada. / Font: Imatges procedents de NASA EOSDIS PO.DAAC processades per l'autora.

No és fàcil identificar tendències temporals en els ecosistemes marins per a avaluar l'impacte que els canvis ambientals, inclòs el canvi climàtic, hi estan tenint. L'escassetat de registres in situ per a sèries temporals llargues procedents d'estacions marines i campanyes oceanogràfiques, així com les diferències en la instrumentació i la metodologia emprada en la presa de dades, dificulten les anàlisis retrospectives. Les taxes calculades varien depenent de l'escala espacial (global, regional o local), de la zona analitzada i del període de temps referit.

Diversos autors, a partir de les bases de dades de temperatura superficial de la mar (SST per les sigles en anglès de sea surface temperature) recopilades en el Centre Hadley de l'Oficina Meteorològica del Regne Unit, identifiquen un període de descens de temperatura entre 1948 i 1970 seguit d'un període d'escalfament accelerat des de llavors (Belkin, 2009; Trenberth et al., 2007). Segons aquests autors, en el període de 1982 a 2006 la temperatura superficial al Mediterrani es va incrementar 0,71 °C, la qual cosa

converteix aquesta mar en una de les àrees del planeta (juntament amb la mar Bàltica, mar del Nord, mar del Japó i mar de la Xina) catalogada d'«escalfament ràpid», amb taxes que multipliquen per 2-4 la mitjana global.

Els informes recents del Servei de Vigilància Mediambiental Marina Copernicus (CMEMS, en les seues sigles en anglès), a partir de les observacions (in situ i de satèl·lit) disponibles (Von Schuckmann et al., 2018), assenyalen un escalfament global en els oceans des de 1993 de 0,016 °C/any, amb xifres molt superiors en el cas del Mediterrani (0,04 °C/any).

«Els principals problemes mediambientals que identifiquem al Mediterrani guarden relació amb la climatologia i la hidrologia de la conca»

En el Mediterrani peninsular tampoc hi ha dubte de l'increment de temperatura i salinitat tant en les capes superficials com les intermèdies i profundes. L'últim informe Cambio climático en el Mediterráneo español (Vargas-Yáñez et al., 2010) indica un augment mitjà de la temperatura superficial de la mar per al període 1948-2005, que varia entre 0 i 0,5 °C segons la zona del litoral mediterrani; en profunditats intermèdies (200-600 m) l'augment es calcula entre 0,05 i 0,2 °C i en les capes profundes, entre 0,03 i 0,1 °C. Si bé l'increment en les capes profundes podria semblar menor, atesa l'alta calor específica de la mar, increments petits impliquen que la mar ha absorbit enormes quantitats de calor. Aquest escalfament s'aprecia especialment a partir de la dècada dels setanta.

Els registres sistemàtics d'observació marítima en el Mediterrani peninsular es van implantar, en la major part, a partir de la dècada dels noranta, amb l'excepció de l'estació oceanogràfica de l'Estartit. Aquesta estació –situada en la plataforma continental catalana a 4 km de la costa– comprèn la sèrie oceanogràfica ininterrompuda més llarga del Mediterrani, ja que registra dades des de la dècada dels setanta. A partir d'aquestes observacions, Salat, Pascual, Flexas, Chin i Vazquez-Cuervo (2019) assenyalen una taxa d'escalfament de 0,03 °C/any en les capes superficials, amb valors superiors (0,09 °C/any) registrats en l'última dècada. Els mateixos autors també identifiquen variacions estacionals, amb taxes més elevades en la primavera (0,039 °C/any).

Què ens diuen els satèl·lits d'observació sobre el Mediterrani?

A partir dels anys vuitanta, les imatges tèrmiques obtingudes pel sensor Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) a bord dels satèl·lits NOAA van proporcionar una visió sinòptica i contínua que complementa els registres in situ. La radiació que registren els sensors es considera representativa de la temperatura superficial de la mar, un paràmetre clau en els estudis climàtics. Amb el temps, s'han sumat altres sensors com el Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) que permeten derivar la temperatura superficial de la mar i altres paràmetres oceanogràfics amb precisió.



Figura 3. Evolució de la temperatura superficial de la mar en les conques liguiprovençal, balear, algeriana i d'Alborán per al període 1985-2019 a partir d'imatges tèrmiques dels satèl·lits NOAA i MODIS. La taxa d'escalfament mitjà obtinguda és de 0,03 °C/any.

En els inicis de la teledetecció espacial a Espanya, la tesi doctoral La temperatura del mar Balear a partir de imatges de satèl·lit (López García, 1991) producte de la col·laboració entre el Departament de Geografia i la Unitat de Teledetecció del Departament de Termodinàmica de la Universitat de València, va mostrar el potencial de les imatges tèrmiques per al coneixement de la hidrologia del Mediterrani i va marcar l'inici de la investigació que ací es presenta. Trenta anys més tard –comprovada àmpliament la viabilitat de les imatges– la disponibilitat de sèries d'imatges de qualitat i longitud suficient i la possibilitat de contrastar els resultats amb les dades obtingudes per altres autors, ens han permès confirmar les tendències assenyalades en anteriors publicacions (López García, 2015; López García i Camarasa, 2011). A continuació es presenta una síntesi actualitzada d'aquestes investigacions.

«En les tres últimes dècades, el Mediterrani ha experimentat un augment de la temperatura superficial global estimat entre 0,6-1 °C»

Diversos estudis (López García i Camarasa, 2011; Mohamed, Abdallah, El-Din, Nagy i Shaltout, 2019; Nykjaer, 2009; Shaltout i Omstedt, 2014; Skliris et al., 2012) basats en dades de satèl·lit apunten taxes d'escalfament del Mediterrani que oscil·len entre 0,015 i 0,04 °C/any depenent de la regió i període de temps considerats. Els valors més alts (0,05 °C/any) s'identifiquen en el Mediterrani oriental. Sintetitzant, pot afirmar-se que, en les tres últimes dècades, el mar Mediterrani ha experimentat un augment de la temperatura superficial global estimat entre 0,6-1 °C. Algunes prediccions sobre la base d'aquestes dades, i tenint en compte les tendències dels últims anys, alerten d'un increment que podria arribar fins als 5,8 °C per a 2100 (Sakalli, 2017).

La nostra anàlisi, centrada en les conques liguiprovençal, balear, algeriana i d'Alborán del Mediterrani occidental, abasta la sèrie d'imatges tèrmiques mensuals disponible des de gener de 1985 actualitzada fins a octubre de 2019.[1]

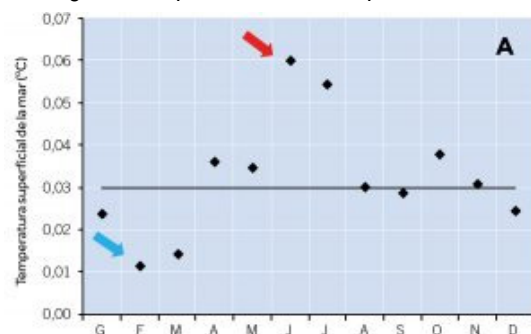


Figura 4. El gràfic A representa les taxes de variació (°C/any) de la temperatura superficial de la mar (o SST per les seues sigles en anglès) calculades segons els mesos. Els valors més baixos es produeixen a l'hivern (febrer i març) i els màxims a la primavera-estiu (juny i juliol). La línia horitzontal assenjala la taxa mitjana anual (0,03 °C/any). Totes les tendències són significatives (els valors de p oscil·len entre <0,0001 i 0,034) a excepció del mes de febrer, que no va ser estadísticament significatiu.

La corba estacional mitjana obtinguda per a la sèrie analitzada i en el conjunt de la zona assenjala el mínim mensual al febrer (14 °C) i el màxim a l'agost (25 °C). No obstant això, alguns anys (agost de 2003, setembre de 2009 i agost de 2018) s'han registrat valors mensuals superiors a 28 °C en alguns punts de la conca. La

Figura 2 presenta, a tall d'exemple, la variabilitat espacial de la temperatura a l'hivern i a l'estiu en les diferents subconques. La situació típica hivernal mostra un clar gradient latitudinal amb aigües més fredes a la conca liguroprovençal i més càlides a la d'Alborán. La situació estival es caracteritza per l'escalfament de les conques centrals (balear i algeriana) mentre que les aigües d'influència atlàntica a Alborán són sempre comparativament més fredes.

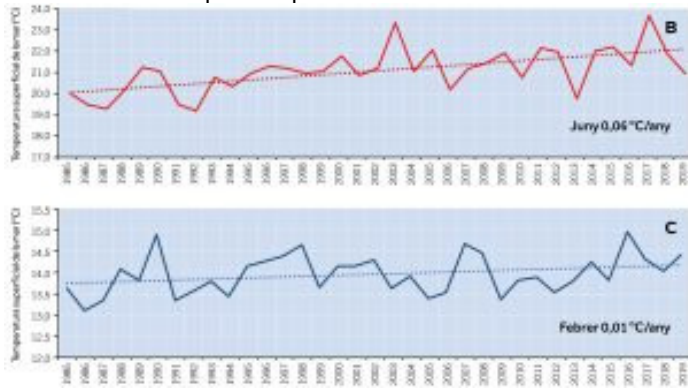


Figura 4: Els gràfics B i C representen els ajustos temporals per als mesos de juny i febrer.

L'escalfament recent del Mediterrani resulta evident quan s'observa la corba d'evolució obtinguda per al període 1985-2019 (Figura 3). El gràfic representa la temperatura mitjana calculada per a totes les conques en cada mes. S'ha aplicat una mitjana mòbil de 12 per a filtrar l'efecte estacional. La taxa de variació resultant per al conjunt de les conques és de 0,03 °C/any, la qual cosa suposa un increment total de la temperatura d'aproximadament 1 °C en les dècades analitzades.

Estius més llargs i càlids

El càlcul de les taxes d'escalfament per mesos va evidenciar diferències estacionals que oscil·len entre valors mínims a l'hivern (~0,01 °C/any al febrer i març) i màxims a la primavera-estiu (~0,06 °C/any al juny i juliol) (Figura 4).

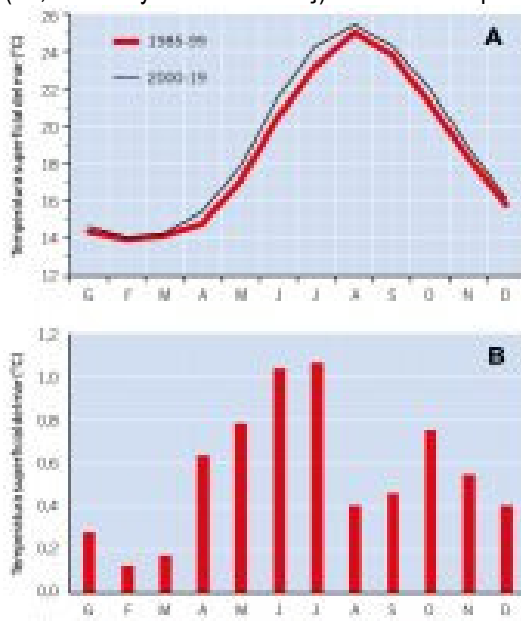


Figura 5. A) Corbes estacionals mitjanes de la temperatura superficial de la mar per als períodes 1985-1999 i 2000-2019. B) Increment de temperatura per mesos entre els dos períodes. Els canvis en la corba estacional evidencien l'avançament i prolongació de l'estiu, amb increments de temperatura d'1°C a l'estiu i de 0,5°C a la tardor entre els dos períodes.

Aquestes dades confirmen els resultats ja publicats (López García, 2015) que indicaven que l'escalfament al Mediterrani es produeix fonamentalment durant els mesos de primavera-estiu, la qual cosa implica canvis en la corba estacional. Si l'escalfament de la mar en els últims 35 anys s'estima aproximadament en 1 °C, la veritat és que aquest increment s'ha produït fonamentalment en els mesos juny i juliol quan la temperatura ha augmentat quasi 2 °C.

Les variacions en la corba estacional es poden observar més clarament en la Figura 5 on s'han representat les corbes estacionals mitjanes calculades per als períodes 1985-1999 i 2000-2019, juntament amb els increments de temperatura mensuals entre els dos períodes en valors absoluts. En la dècada inicial (1985-1999) solament es van superar els 24 °C de mitjana el mes d'agost, mentre que en les dècades recents (2000-2019) es van superar els 24 °C de mitjana en tres mesos (juliol, agost i setembre), i es van registrar mitjanes mensuals pròximes a 27 °C a l'agost de 2003 i 2018. Aquests resultats evidencien l'avançament de l'estació

estival i també la seua intensificació, amb increments de temperatura en les dues últimes dècades a la primavera-estiu (~1 °C) i a la tardor (~0,7 °C).

Conclusió

L'anàlisi realitzada en les conques occidentals del Mediterrani constata un ràpid escalfament en les tres últimes dècades, amb una taxa mitjana de 0,03 °C/any que arriba a valors superiors segons la regió del Mediterrani analitzada. Aquestes xifres concorden amb les publicades recentment per altres autors i confirmen les tendències apuntades en estudis previs referits al període 1985-2009 (López García, 2015). L'escalfament al Mediterrani peninsular s'està produint fonamentalment en els mesos de primavera-estiu i tardor, i s'aprecia una tendència clara a l'avançament, prolongació i intensificació de l'estiu.

«Existeix un consens creixent que l'escalfament no és una projecció de futur sinó una realitat evident»

Les conseqüències de l'escalfament del Mediterrani en aspectes com la pujada del nivell de la mar, la possible alteració dels patrons de circulació marina, l'abundància, distribució i estructura d'espècies marines o la freqüència i intensificació de processos atmosfèrics com les DANA (Depressions Aïllades en Nivells Alts) són objecte d'interès i investigació per part de la comunitat científica, com ha posat de manifest l'informe especial de l'IPCC titulat El océano y la criosfera en un clima cambiante (25 setembre 2019). Si bé la causalitat i atribució d'aquestes conseqüències al canvi climàtic continua sent difícil de destriar, existeix un consens creixent pel que fa a l'escalfament, que no és una projecció de futur sinó una realitat evident.

És procedent la reflexió sobre el paper de l'ésser humà com a principal agent inductor d'aquest escalfament, però també de la seua responsabilitat en els múltiples processos que han alterat les riberes del Mediterrani i la mateixa mar: la urbanització desmesurada del litoral i l'alteració dels ecosistemes naturals litorals, la intensificació agrària i sobreexplotació d'aqüífers, la contaminació fluvial i marina i la sobreexplotació pesquera, entre altres actuacions, afecten i acceleren els impactes que no han de ser atribuïts solament a l'escalfament de la mar. És necessària una presa de consciència clara i la implantació d'actuacions immediates que permeten frenar i mitigar els problemes ambientals a què ens enfrontem.

Notes

[1] Per al període 1985-2009 es van utilitzar les imatges del satèl·lit NOAAVHRR procedents de l'arxiu Pathfinder del Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) v.5 i per al període 2000-2019, les imatges del sensor MODIS-Terra Level 3 v2014. En els dos casos, es van analitzar imatges nocturnes, amb resolució espacial de 4 km, corregides mitjançant els algorismes testats i validats per la NASA. Les dades estan disponibles en línia en el Jet Propulsion Laboratory (NASA). La disponibilitat de dades per al període 2000-2009 procedents de totes dues fonts i la seua elevada correlació ($r^2 = 0,99$) va permetre l'homogeneïtzació de la sèrie (López García, 2020).

Referències

- Belkin, I. (2009). Rapid warming of large marine ecosystems. *Progress in Oceanography*, 51(1-4), 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2009.04.011>
- Bergamasco, A., & Malanotte-Rizzoli, P. (2010). The circulation of the Mediterranean Sea: A historical review of experimental investigations. *Advances in Oceanography and Limnology*, 1(1), 11–28. <https://doi.org/10.1080/19475721.2010.491656>
- Bethoux, J. P., Gentili, B., Morin, P., Nicolas, E., Pierre, C., & Ruiz-Pino, D. (1999). The Mediterranean Sea: A miniature ocean for climatic and environmental studies and a key for the climatic functioning of the North Atlantic. *Progress in Oceanography*, 44(1-3), 131–146. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(99\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(99)00023-3)
- García-Martínez, M. C., Vargas-Yáñez, M., Moya, F., Zunino, P., & Bautista, B. (2018). The effects of climate change and rivers damming in the Mediterranean Sea during the twentieth century. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 8(4), 555741. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2018.08.555741>
- IPCC. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK / Nova York, NY, EUA: Cambridge University Press.
- López García, M. J. (1991). *La temperatura superficial del mar Balear a partir de imágenes de satélite* (tesis doctoral). Universitat de València, Espanya.
- López García, M. J. (2015). Recent warming in the Balearic Sea and Spanish Mediterranean coast. Towards an earlier and longer summer. *Atmósfera*, 28(3), 149–160. <https://doi.org/10.20937/ATM.2015.28.03.01>
- López García, M. J. (2020). SST Comparison of AVHRR and MODIS Time Series in the Western Mediterranean Sea. *Remote Sensing*, 12(14), 2241. <https://doi.org/10.3390/rs12142241>
- López García, M. J., & Camarasa, A. M. (2011). Recent trends of SST in the Western Mediterranean basins from AVHRR Pathfinder data (1985-2007). *Global Planetary Change*, 78(3-4), 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.06.001>
- Millot, C., & Taupier-Letage, I. (2005). Circulation in the Mediterranean Sea. En A. Salot (Ed.), *The Mediterranean Sea. Handbook of environmental chemistry* (vol. 5K, p. 29–66). Berlín, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/b107143>
- Mohamed, B., Abdallah, A. M., El-Din, K. A., Nagy, H., & Shaltout, M. (2019). Inter-annual variability and trends of sea level and sea surface temperature in the Mediterranean Sea over the last 25 years. *Pure Applied Geophysics*, 176(8), 3787–3810. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02223-2>
- Nykjaer, L. (2009). Mediterranean Sea surface warming 1985-2006. *Climate Research*, 39, 11–17. <https://doi.org/10.3354/cr00794>
- Sakalli, A. (2017). Sea surface temperature change in the Mediterranean Sea under climate change: A linear model for simulation of the sea surface temperature up to 2100. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(1), 707–716. https://doi.org/10.15666/aeer/1501_707716
- Salat, J., Pascual, J., Flexas, M., Chin, T. M., & Vazquez-Cuervo, J. (2019). Forty-five years of oceanographic and meteorological observations at a coastal station in the NW Mediterranean: A ground truth for satellite observations. *Ocean Dynamics*, 69, 1067–1084. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01285-z>
- Shaltout, M., & Omstedt, A. (2014). Recent sea surface temperature trends and future scenarios for the Mediterranean Sea. *Oceanologica*, 56(3), 411–443. <https://doi.org/10.5697/oc.56-3.411>
- Skiris, N., Sofianos, S., Gkanasos, A., Mantziou, A., Vervatis, V., Axaopoulos, P., & Lascaratos, A. (2012). Decadal scale variability of sea surface temperature in the Mediterranean Sea in relation to atmospheric variability. *Ocean Dynamics*, 62, 13–20. <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0493-5>
- Trenberth, K. E., Jones, P. D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Tank, K., ... Zhai, P. (2007). Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. En S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, ... H. L. Miller (Eds.), *Climate change 2007: The physical science basis* (p. 235–336). Cambridge, Regne Unit i Nova York: Cambridge University Press.
- Vargas-Yáñez, M., García, M. C., Moya, F., Tel, E., Parrilla, G., Plaza, F., ... García, M. J. (2010). Cambio climático en el Mediterráneo español. *Temas de Oceanografía*, 3 (2ª ed). Madrid: Instituto Español de Oceanografía y Ministerio de Ciencia e Innovación.
- Von Schuckmann, K., Le Traon, P. Y., Smith, N., Pascual, A., Brasseur, P., Fennel, K. & Djavidnia, S. (Eds.). (2018). Copernicus marine service ocean state report. *Journal of Operational Oceanography*, 11(sup1), S1–S142. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2018.1489208>

Agraïments

Totes les imatges de satèl·lit utilitzades en aquesta investigació han estat proporcionades gratuïtament per la NASA a través de l'Earth Science Data and Information System (ESDIS) i el Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PO.DAAC) del Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA. L'autora agraeix les dades proporcionades i l'assistència tècnica rebuda.

© Mètode 2020 - 107. Oceans - Volum 4 (2020)

María José López García

Catedràtica de Geografia Física del Departament de Geografia de la Universitat de València (Espanya), especialitzada en tecnologies de la informació geogràfica. La seua investigació se centra en el desenvolupament de metodologies i aplicacions de la teledetecció espacial per a l'anàlisi del canvi global en àmbits mediterranis, especialment la variabilitat espaciotemporal de la temperatura del mar, la qualitat d'aigües i els canvis dels usos del sòl. Ha realitzat estàncies de recerca en el Departament de Geografia de la University of Bristol, en el d'Océanologie de Marsella (IFREMER) i en el King's College de Londres, i col·laborat en diversos projectes de recerca d'àmbit autonòmic, nacional i europeu.

maria.j.lopez@uv.es

Al número 230 d'aquesta col·lecció, amb el títol “Canvi global en el mar” es van recollir tres articles del monogràfic “OCEANS. L'impacte del canvi global en el mar” publicat al número 107 (Volum 4 del 2020) de Mètode, la revista de divulgació científica de la Universitat de València.

Per confeccionar aquest altre, amb el títol “Oceans” hem triat tres articles més del mateix monogràfic.

Són:

“L'augment del nivell de la mar” de Francisco José Navarro

“La contaminació invisible” de Belén González Gaya

“Quant s'està escalfant el Mediterrani?” de Maria José López García

Col·lecció Documents d'ant n°244