

Ozeano Artikoko bankisaren beherakada: behaketak berrikusten, kausa fisikoak ulertzen eta etorkizuneko aldaketak iragartzen*

P. Elosegui

Institute for Space Sciences (ICE) eta Marine Technology Unit (UTM).
National Research Council (CSIC, E-08003 Bartzelona)

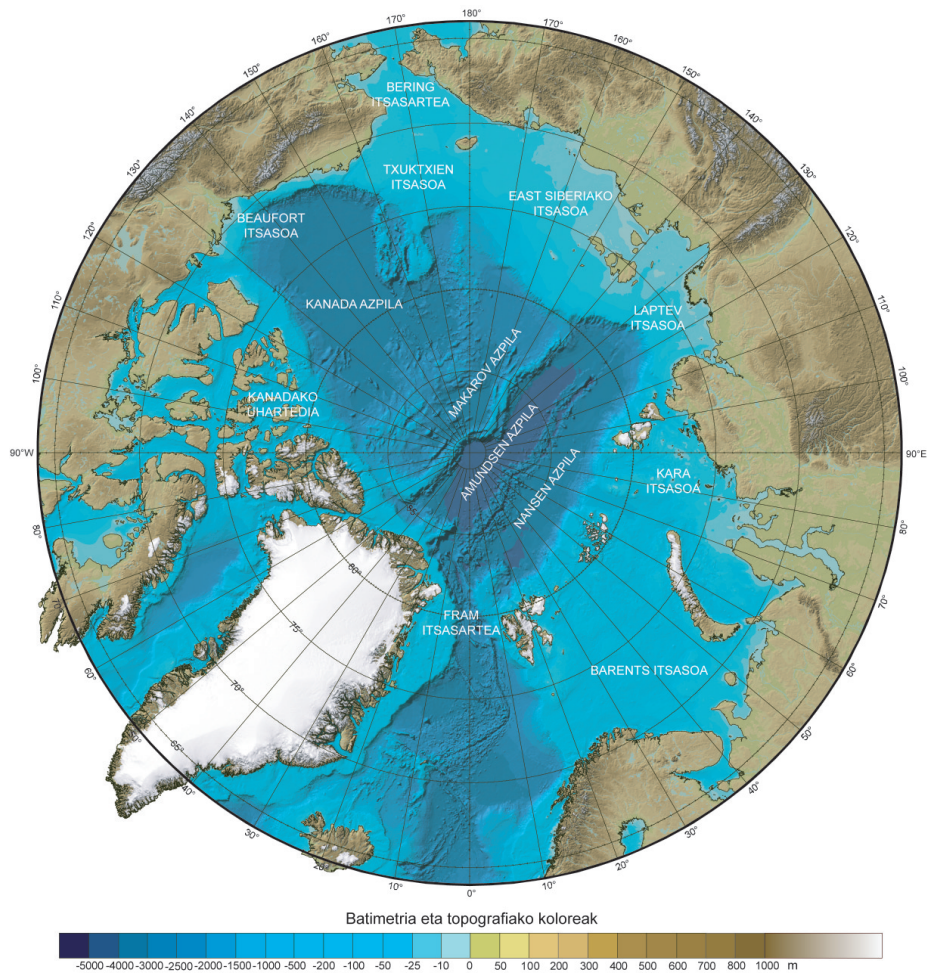
Laburpena: Ozeano Artikoa bankisa mehe batez estalita dago. Bankisa klima polarra taxutzen duen faktore garrantzitsuetako bat da, eta eragina izan dezake klima-sistema globalean ere. Garrantzi hori dela eta, beharrezkoa da Artikoko bankisa horren egoerari begiratzea eta hura ulertzea eta aurreikustea.

Behaketek argi eta garbi erakutsi dute izotzaren hedadura eta lodiera murrizten ari direla eta izotz iraunkorra zena aldikako izotz ari dela bilakatzen. Inolako zalantza-izpirik gabe, Artikoko bankisa gainbehera nabarian dago. Bankisaren gainbehera hori ulertzeko, aldaketa horien kausa izan litezkeen prozesu termodinamiko eta dinamiko giltzarriak aztertu behar dira. Prozesuon artean daude, besteak beste, faktore fisikoak (adibidez, epeltzeko joerak), atmosferako eta ozeanoko zirkulazioan gertatutako aldaketak, ozeanoaren gainazalera iristen den eguzki-erradiazio handiagoa eta horri lotutako izotz-albedoaren berrelikadura. Gaur egungo ereduak aurreikusten dute mende hau amaitu baino lehen Ozeano Artikoa izotzik gabe geratuko dela udako urtze-garaia-
ren bukaeran. Behaketek, baina, erakusten dute bankisaren beherakada ez dela ereduak iragarritako abiaduran gertatzen ari, azkarrago baizik, eta agerian uzten dute ereduak hobetzeko premia. Artikoko bankisaren gainbeherak ondorio garrantzitsuak ditu Artikoko eta Lurreko klima-sistematan, eta, gainera, gero eta erronka handiagoak ezartzen ditu alor sozioekonomikoan, politikoan eta ekologikoan.

Abstract: The Arctic Ocean is covered by a thin layer of sea ice. Sea ice plays an important role in determining Arctic climate, and it can also have an influence in the global climate system. This importance creates a need to observe, understand, and predict the state of the Arctic sea-ice cover. Observations unambiguously show that the ice extent is decreasing, the ice thickness is thinning, and that there is a shift from perennial ice to seasonal ice. It is beyond doubt that Arctic sea ice is in marked decline. Understanding the observed decline in sea ice involves examining the key thermodynamic

* Artikulu hau, aldizkariaren hizkuntz irizpideetatik aske argitaratzen da.

and dynamic processes that can cause such changes. These include physical factors such as warming trends, shifts in atmospheric and oceanic circulation, increased solar radiation reaching the ocean surface, and the associated ice-albedo feedback. Current models predict an ice-free Arctic Ocean at the end of the Summer melt season by the end of this century, but observations reveal that the ongoing sea-ice decline is occurring more rapidly than model-based projections, highlighting the need of model improvements. A declining Arctic sea ice has important implications not only for both the Arctic and the global climate system, it also poses mounting socio-economic, political, and ecological challenges.

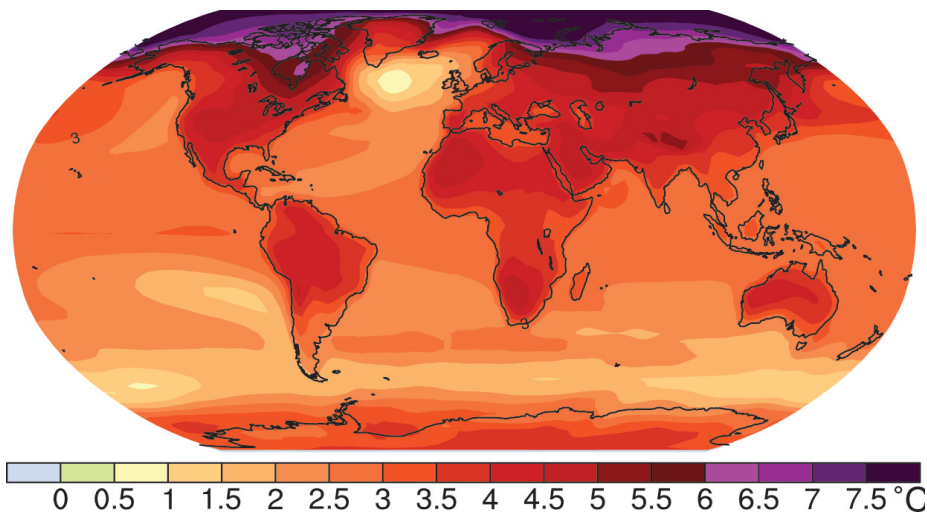


1. irudia. Ozeano Artikoko batimetria, inguruko topografia, eta ezaugarri geografiko nagusiak (Iturria: International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean).

SARRERA

Polo-inguruek beti piztu izan diete irudimena abenturazaleei eta toki ezezagunaren maitaleei. Poloetako esploratzaile handiek sekulakoak eta bi egin zituzten munduaren amaieretara heltzeko (Ipar Polora nahiz Hego Polora) eta alegiazko Ipar-mendebaldeko Igarobidea aurkitzeko, munduaren goi-goitik Atlantikoaren eta Ozeano Pazifikoaren artean batetik bestera nabigatzeko aukera emango zuen bidea. Itzultzen zirenek (asko ez baitziren inoiz itzuli) istorio liluragarriak kontatzen zituzten, oinpean izozten zitzaizkien ozeanoei buruzkoak. Benetan abentura heroikoak kontatzen zituzten. Eta, jakina, errealitatea are txundigarriagoa zen, dramatikoagoa. Hemen kontatuko dugun istorioa ozeanorik iparraldekoenean (Ozeano Artikoan) bankisa jasaten ari den beherakada nabarmenari buruzkoa da (1. irudia).

Lehenengo esploratzaile haiek Artikoa estreinako zapaldu zutenetik, arrazoi asko izan dira bankisa aztertzeko; besteak beste, operazio militarrek, lurren gaineko subiranotasun-aldarrikapenak, baliabide naturalen esplorazioa eta ustiapena, eta ikerketa zientifikoak. Gaur egun, Artikoko ikerketa gehienak klima-aldaketa aztertzeko egiten dira. Sistema artikoaren gaur egungo egoeraren segimendua egiten badugu, hobeto ulertuko dugu klima-aldaketa, eta, azkenerako, iragarpen hobek egin ahal izango ditugu aldaketa horrek eskualde batean edo mundu osoan izango dituen efektuen gainean. Adibidez, klima globalaren eredu sorta bat erabiliz, Klima Aldaketari buruzko Gobernu arteko Taldeak (edo IPCC, *International Panel on Climate Change* ingelesezko izenagatik) Laugarren Ebaluazio Txostenean (AR4) iragarri zuen lurrazaleko tenperaturak zenbait gradu igoko direla mundu osoan (2. irudia)



2. irudia. Mundu mailako Lurrazalaren tenperaturaren aldaketaren proiektzioa, 2090. eko hamarkadan, 1980.ko hamarkadarekiko (Iturria: IPCC, 4. ebaluazio-txostena).

mendearen amaierarako (Solomon *et al.*, 2007). 2. irudian, kolore gorriaren nagusitasuna agerikoa da, eta horrek lurrazalaren berotze orokor bat izango dela esan nahi du, baina irudiak gehien nabarmentzen duena da efektu hori handiagoa izango dela Artikoan. Efektu anplifikatu hori 1980ko hamarkadan iragarri zen, «Artikoko Anplifikazioa» izenpean (Manabe eta Stouffer, 1980), eta Artikoan oso zabaldua dago dagoeneko. Uste da bi gertaeraren ondorio dela fenomeno hori: alde batetik, bankisa gero eta azkarrago urtea; eta, bestetik, ozeanoak eta atmosferak gero eta bero handiagoa garraiatzea ekuatore inguruetatik polo inguruetara (adib.: Serreze *et al.*, 2008).

Artikoa sistema konplexua da, ozeanoaren, atmosferaren eta kriosferaren (izotz- eta elur-forma guztiak) artean diren aldaketa interkonektatuek osatua. Artikoko bankisak urte asko daramatza gainbeheran, sateliteak abian jarri zirenetik (1979tik), behintzat, bai. Oraingo joera horiek berean jarraitzen badute, ez dakigu bankisak iraungo duen (adib.: Wang eta Overland, 2009). Azken batean, Artikoa ikus dezakegu klima-aldaketaren bide-erakusletzat. Horregatik, Artikoko bankisaren aldaketaren segimendua egitea da giltzarria klima-aldaketa hobeto ulertzeko. Hurrengo lerroetan, bankisak klima-sisteman duen garrantzia nabarmenduko dugu lehenik; hori argi utzi ondoren, behaketa garrantzitsu batzuk berrikusiko ditugu, bankisa nola ari den murrizten erakuste aldera; bankisaren aldaketa horren zergatia ulertzen saiatuko gara gero; eta, azkenik, klima-ereduek etorkizun hurbilari buruz diotenari erreparatuko diogu.

BANKISA ETA KLIMA-SISTEMA

Bankisa Ozeano Artikoaren bereizgarri handiena da. Ozeanoko ura hoztu eta izozten denean itsas gainean eratzen den izotzezko mantua da. Lodiera aldetik, metro gutxi batzuk izaten ditu, batez beste; hedadura aldetik, ordea, milioi bat kilometro koadro baino gehiago har ditzake. Bankisa oso aldakorra da denboran eta espazioan. Urtaroekin batera aldatzen da: negu ilunetan, hazi egiten da, eta, uda argitsueta, zero gradutik hurbileko tenperaturak egiten dituenean, urtu eta txikiagotu egiten da. Espazioan, izotzik gabeko ur irekia izatetik tontor garai eta lodiak (hainbat eta hainbat metrokoak) eratzerara igaro daiteke (3. irudia). Izan ere, haizeak eta ozeanoko lasterrek jitoan eramaten dute bankisa, eta egunean hainbat kilometro mugiarazten dute.

Bankisak zeregin garrantzitsua betetzen du klima polarrean, eta klima globalean ere eragina duela uste da. Adibide batzuk ikusiko ditugu garrantzi horretaz ohartzeko. Bankisak iristen zaion eguzki-erradiazio gehiena islatu egiten duenez (hots, albedo handia duenez), eguzki-energia gutxiago iristen da ozeanora (itsasoan ura bakarrik dagoenean baino gutxiago), eta



3. irudia. Gailurrak sortzen dira haizeek itsasoko izotzaren konbergentzia sortzen duten guneeetan; kasu honetan 85°N latitudean, Groenlandiako iparraldean. (Iturria: P. Eloseguiaren argazkien bilduma).

bankisa gaineko airearen tenperatura hotza ez da epeltzen. Aire hotzak izotz-formazioa dakar, eta horrek, era berean, gehiago hozten du airea. Berrelikadura-mekanismo positibo bat sortzen da hala, «izotz-albedoaren berrelikadura» izenekoa. Bankisak balio du, halaber, ozeanoaren eta atmosferaren artean oztopo termiko eta mekaniko eraginkor bat finkatzeko. Oztopo termikoa da, jasotako eguzki-energia gehiena espaziora islatzen duelako eta moteldu egiten duelako itsasoaren eta atmosferaren arteko bero- eta hezetasun-trukea. Oztopo mekanikoa da, haize-energia indargabetzen duelako eta, hala, atmosferaren eta ozeanoaren arteko momentu-transferentzia moteltzen duelako. Eta itsasoko ura izozteko (nahiz bankisa urtzeko) prozesuetan, sekulako gorakada (beherakada) izaten da itsasoko uraren gazitasunean. Horrek aldatu egiten du uraren dentsitatea, eta eragina du zirkulazio termohalino delakoan eta ur sakoneko formazioan. Prozesu fisiko horiek eta beste batzuek aldi berean egiten dute lan, eta elkarri lotuta daude. Artikoko nahiz Lurreko klimaren eredu modernoek bankisaren irudikapen aurerratuak eskaintzen dituzte (adib.: Hunke *et al.*, 2010).

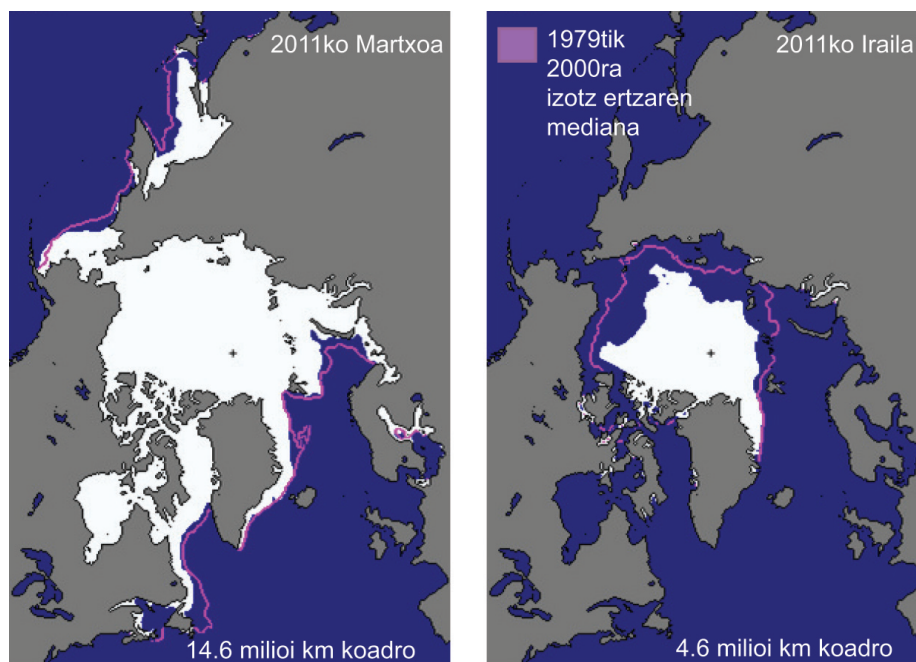
ZEIN DIRA ARTIKOKO BANKISAREN ALDAKETAN EGIN DIREN BEHAKETA GILTZARRIAK?

Ozeano Artikoko berealdiko eguraldi gogorak eta inguru zailak benetako oztipoa ezarri zien ikertzaileei tresnak erabiliz Artiko osoko bankisa-

ren egoeraren gainean behaketa esanguratsuak egiteko. Sateliteen aroa iritsi baino lehen, behaketak urriak ziren, bai denboran, bai espazioan, eta gehienak isilpekoak izaten ziren, itsaspekoek egiten baitzituzten Gerra Hotzeko operazio militarren barruan. Garai hartan uste zen Artikoko izotzezko geruzak egoera egonkorra zuela, eta urtaroen araberako zikloa zuela (neguan izoztu egiten zen, eta udan, urtu). Ikuspegi hori 1979an aldatu zen goitik behera, satelite bidezko behaketak hasi zirenean. Behaketa horiek Ozeano Artikoko bankisaren eraldaketari buruz zer dioten ikusiko dugu orain, bankisaren hiru parametro nagusiri erreparatuta: hedadura, lodiera eta adina.

Bankisaren hedadura txikiagotzen ari da

Bankisaren hedadura ohiz eta zehatz kalkulatu daitezke sateliteetatik mikrouhin bidezko neurketa pasiboak eginez, urari dagokion gorputz beltzaren tenperatura eta izotzari dagokiona oso ezberdinak baitira (adib.: Carsey, 1992). Behaketa horiek Ozeano Artiko osoa hartzen dute aztergai, eta 1979tik daude eskuragarri, etenik gabe. Bi urte-sasoitan ikusten da ondoen bankisaren hedaduraren urtarokako zabaltze- eta murrizte-zikloa: martxoan, izozte-garaiaren amaieran, eta irailean, urtze-garaiaren amaieran (4. irudia). 4. irudian ikusten da martxoko goreneko puntuan bankisak Artikoko Arro

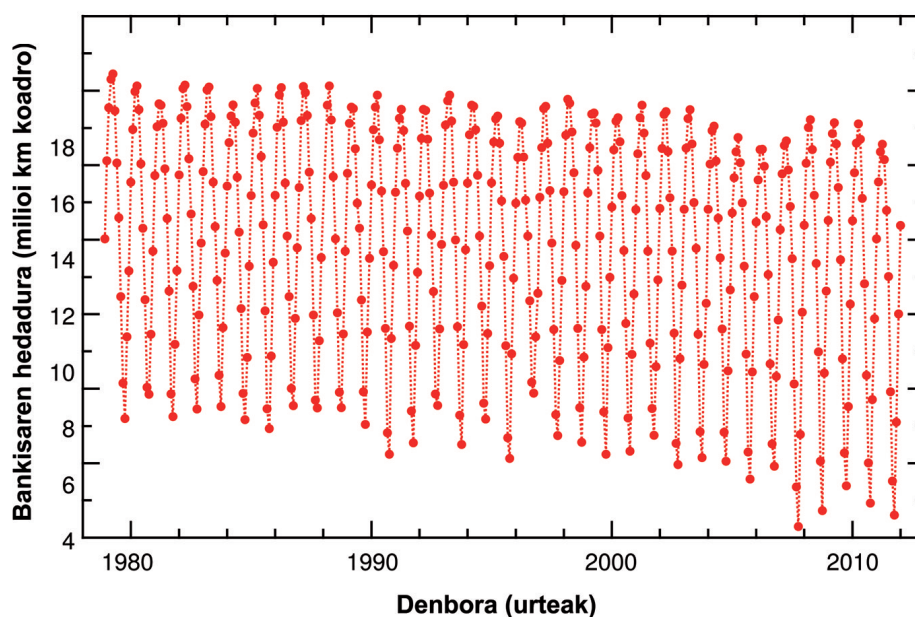


4. irudia. Bankisaren hedadura Ozeano Artikoan, 2011.ko martxoan eta irailean (Iturria: National Snow and Ice Data Center).

Ozeano Artikoko bankisaren beherakada: behaketak berrikusten, kausa fisikoak ulertzen eta etorkizuneko aldaketak iragartzen

osoa estaltzen duela eta inguruko itsasoetaraino heltzen dela; 15 milioi km² inguru hartzen ditu, Espainiaren azalera halako 30 inguru, alegia. Iraileko behereneko punturako, bankisa murriztu egiten da, eta Ozeano Artikoaren erdigunera mugatzen da; lehenagoko azaleraren erdira jaisten da.

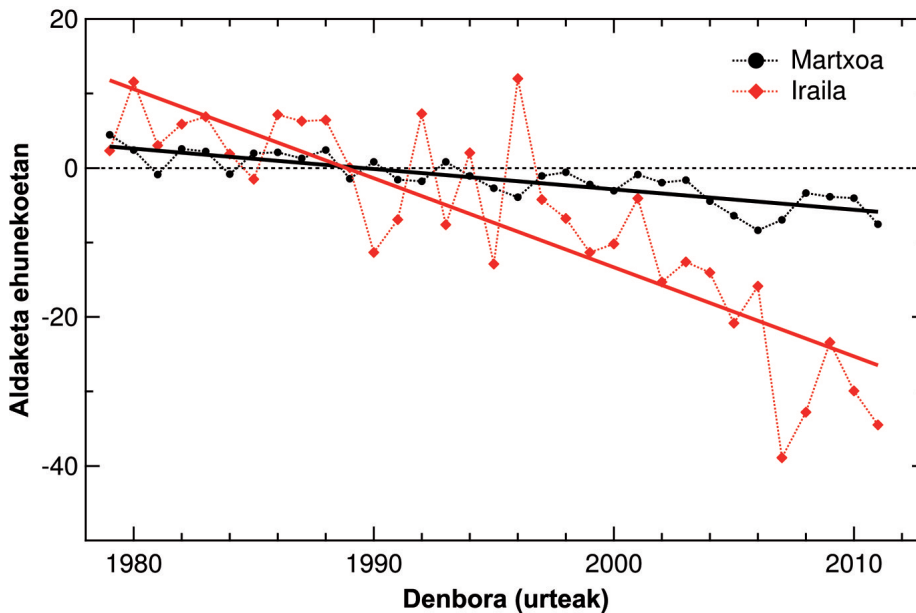
Klima-aldaketaren gaia jorratzeko, garrantzitsuagoa da bankisaren hedadurak denbora-eskala luzeetan zehar izan duen aldakuntza urtarokako gorabeherak baino. 5. irudian, 1979tik aurrerako bankisaren hedaduraren hilabetekako batez bestekoak daude jasota. Hor, urtarokako zikloa hain deigarria da, non nekez jar baitezakegu arreta epe luzeko adierazleetan. Adierazleok azaleratzeko, anomaliari begiratuko diegu lehenik. 6. irudiak erakusten du azken 30 urteotan zer aldakortasun izan duten bankisaren hedaduraren hilabetekako batezbestekoek (martxokoek eta irailekoek). Hilabetekako batezbestekoak kalkulatzeko, 1979-2000 urte-tartea erabili da. Irudian agertzen diren beste gauza garrantzitsu batzuk ere aipatuko ditugu banan-banan.



5. irudia. Denboran zeharreko Ozeano Artikoko bankisaren hedaduraren hilabeteko batez bestekoaren aldakortasuna, satelitearen bidezko neurketak hasi zirenetik.

Lehenik, fluktuazioak handiak izan daitezke urtetik urtera, baina esanguratsuenak dira irailean (bankisaren hedaduraren behereneko puntuan) martxoan baino (bankisaren hedaduraren goreneko puntuan). Alde horren

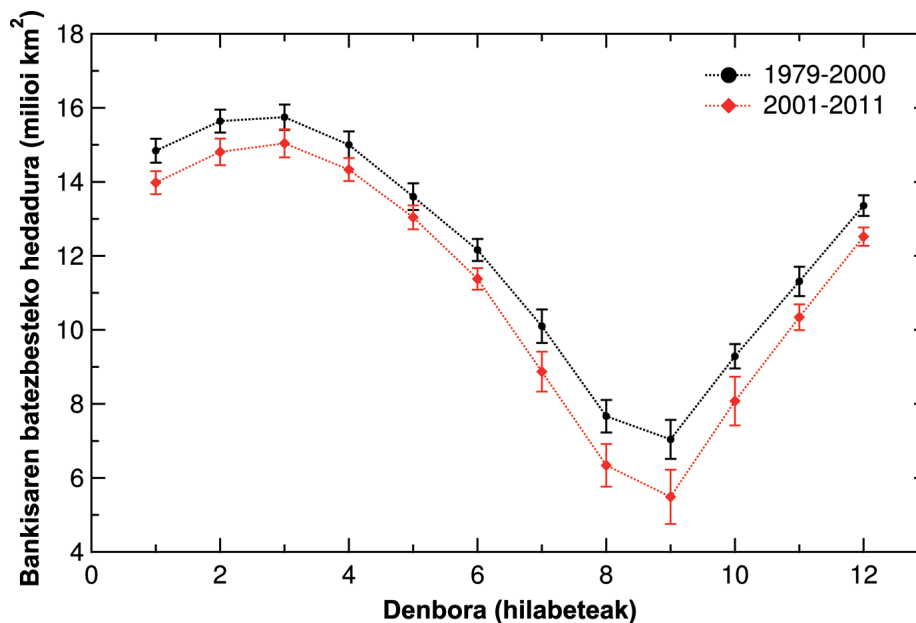
azalpen posible bat *geographic muting*¹ delakoa izan daiteke (Eisenman, 2010). Bigarrenik, joera negatibo argia igartzen zaio, nola neguan hala udan, eta hori garrantzitsuagoa da, beharbada, klimaren aldetik. Bankisaren hedaduraren martxoko murrizte-abiadura % -2,7koa da hamarkada bakoitzeko. Irailekoa harrigarriagoa da: % -12,0 hamarkadako (adib.: Comiso *et al.*, 2008). Hirugarrenik, orain artean jasotako datuen artean hamar balio txikienak azken hamarkadakoak dira; batez ere, 2007koa (baliorik txikiena) eta handik aurrerakoak. Adibidez, 2011ko iraileko balio txikiena 4.330.000 km² izan zen, bildutako datuen artean bigarren txikiena; balio hori abiapuntuko balio txikiena baino 2.100.000 km² txikiagoa zen, hau da, aldea Gipuzkoaren tamaina baino 1.100 aldiz handiagoa zen.



6. irudia. Bankisaren hilabeteko hedaduraren anomaliak (1979-2000 tartean), martxoan eta irailean.

Kontu hori gehiago argitzeko, 7. irudira joko dugu. Han ere bankisaren hilabetekako hedadurak agertzen dira, 5. irudian bezalaxe, baina batez-bestekoak bi denbora-tartetakoak dira: 1979-2000 eta 2001-2011. Irudian agertzen da zenbat txikiagotu den bankisaren hedadura duela bi hamarkadatik azken hamarkadara bitartean. Murrizketa handi samarra da (batez

¹ *Geographic muting*: kontinenteen posizioa eta eiteengatik itsasoko izotzaren ziklo estazionalako anplitudean agertzen diren aldaketak.



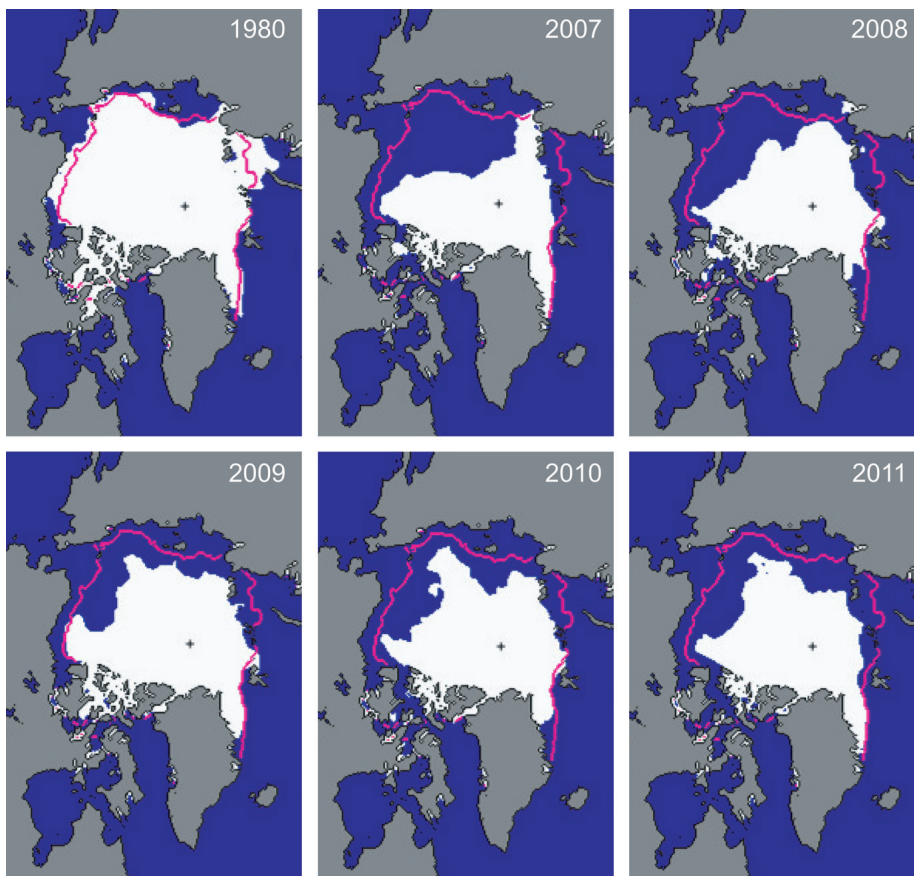
7. irudia. Hainbat hilabeteako bankisaren hedaduraren batez bestekoa 1979-2000 eta 2001-2011 tartean.

bestekoarekiko desbiderapen estandarren ($1-\sigma$) ingurukoa) hil guztietan, baina udako hiletan da handiena, bankisaren hedadurak beheerako balioa hartzen duen garaian. Errore-barra handienak ere udako hiletakoak dira, eta horrek adierazten du bankisaren hedaduraren urtetik urterako aldakortasuna ere balio txikienerako hiletan dela handiena. Bankisaren hedaduraren balio txikienerak banaketa espazialaren aldetik azken hamarkadan izan duen aldakortasuna 8. irudian ikus daiteke. Nabarmentzekoa da azken balio txikienerak jaso diren hilabeteetan bi bide nabigarri zabaldu direla inguru horietan: Ipar-mendebaldeko Igarobide famatua (Kanadako Uhartedi Artikoan) eta Siberia inguruko Iparraldeko Itsas Bidea. Ozeano Artikoa eta inguruko itsasoak osatzen dituzten itsasoetan (Barents, Kara, Laptev, Txuktxi, Beaufort, etab.) zer-nolako bankisa-galera izan den jakin nahi izatera, Meier eta Stroeve-ren eskualdekako azterlanera (2008) jo dezakegu.

Laburbiltzeko, satellite bidezko neurketak hasi zirenetik ikusi da bankisaren hedadura abiadura harrigarrian ari dela murrizten. Horrek iradokitzen du Ozeano Artikoko bankisa kantitatea murrizten ari dela, baina, irudi osatu bat izateko, ezinbestekoa da lehenik izotzaren lodiera (eta bolumena) nola aldatu den jakitea. Hortaz, izotz-lodieraren aldaketaren gainean egin diren behaketak aztertzeari ekingo diogu orain.

Bankisa mehetzen ari da

Esaten da bankisaren lodierak garrantzi handiagoa duela hedadurak baino, haren araberakoa izaten delako bankisa-estalduraren indar mekanikoa, bero-ahalmena eta isolamendu termikoa, eta, beraz, erresilientzia ere bai. Tamalez, bankisaren lodierari buruzko datu sorta ez da bankisaren hedadurari buruzkoaren adinakoa. Horren arrazoia da lodiera kalkulatzeko izotzaren barrua «ikusi» egin behar dela, eta neurketa hori askoz zailagoa da teknikoki izotz-hedaduraren azalera neurtzea baino.



8. irudia. Azken hamarkadako bankisaren hedadura minimoko adibideak, urtez urteko espazio-aldakortasuna adierazteko (Iturria: National Snow and Ice Data Center).

Duela oso gutxira arte, bi eratan egiten ziren lodiera-kalkuluak: edo leku jakin batzuk hartu eta izotza goitik behera zulatuz (9. irudia), edo Ar-

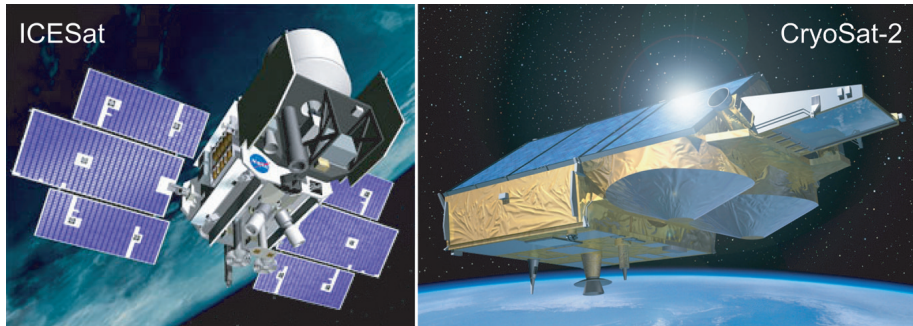


9. irudia. Zientzialariak zunda baten bidez itsasoko izotzaren lodiera neurtzen (Iturria: P. Elosguiren argazkien bilduma).

tikoa zeharkatzeko misioetan zebiltzan itsaspekoek sonar bidez neurtuta, bankisaren azpitik abiatuta goraka. Neurketa horiei esker, bankisaren lodieraren handitze- eta txikitze-balioak jaso ahal izan ziren (adib.: Perovitch eta Elder, 2002). Eskuragarri jarritako datuen bidez, Artikoko dimentsio bakarreko transektuetako izotzaren lodierak kalkulatu ahal izan dira. Behaketa horiek erakutsi zuten bankisa metro bat inguru mehetu zela Artikoaren erdigunean, 1975etik 2000ra bitartean (Rothrock *et al.*, 2008). Zoritxarrez, behaketa horiek urriegiak dira klimaz ezer ondorioztatzeko; horretarako, urte askotako eta Artiko osoko lodiera-datuak behar dira.

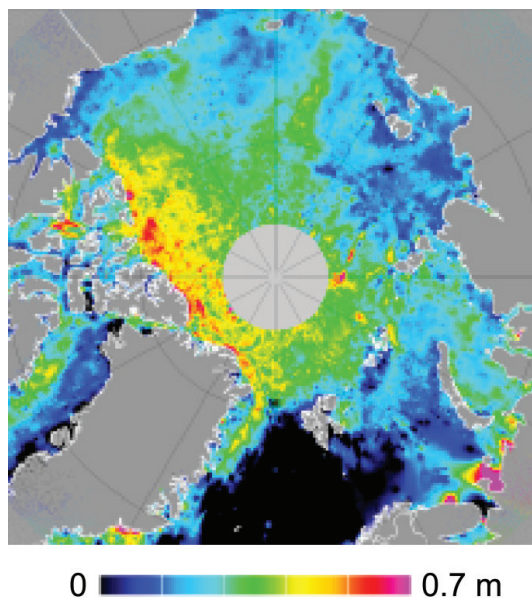
2003an frogatu zen lehenengoz arto osoko kalkuluak egin zitezkeela (Laxon *et al.*, 2003). Radar bidezko altimetriako datuak erabili ziren horretarako, Europako Espazio Agentziaren (ingelesez: *European Space Agency* edo *ESA*) ERS-1 eta ERS-2 (*European Remote Sensing*) sateliteek bildutakoak. Urte berean, NASAk izotz-lodiera neurtzeko laserra daraman satelite bat jaurti zuen espaziora: ICESat (*Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite*). ICESaten laserrak lana egiteari utzi zion 2009an. 2010ean, ordea, ESAk CryoSat-2 jaurti zuen espaziora (Cryosat jaurtitzeko unean galdu zen, 2005ean); radar bidezko altimetro interferometriko bat zen, eta poloko bankisaren lodiera neurtzeko balio zuen hark ere (10. irudia).

Poloen behaketetan ikus daitekeen altimetria nagusia uraren gainean dagoen izotzaren garaiera da, frankobordo izenez ezagutzen dena. Bankisaren lodiera kalkulatzeko, frankobordoaren neurketa eta Arkimedesen prin-



10. irudia. Artikoan zeharreko egungo itsas izotzeko frankobordoren balioesp-
nak sateliteen bidezko altimetria neurketetan datzate; hemen ICESat eta CryoSat-2
adierazten dira (Iturria: NASA eta ESA).

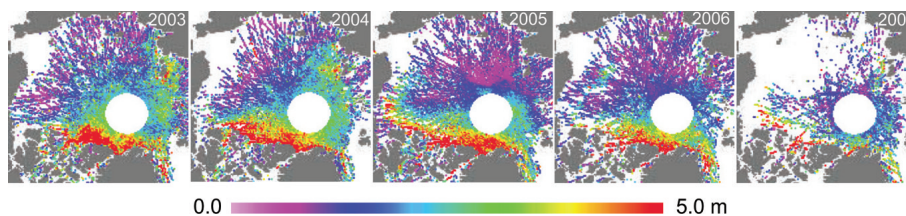
tzipioa erabiltzen dira (ikus eranskina). 11. irudian, bankisaren franko-
bordoaren garaierak ikus daitezke, ICESatek 2003ko martxoan Artikoko
arroan eginiko neurketetatik ateratakoak. Irudiek banaketa espazial berezia
erakusten dute: frankobordo garaienak Groenlandia iparraldeko kostan eta
Kanadako Uhartedi Artikoaren iparralderantz daude; txikiagoak dira Ar-
tikoaren erdialderantz egin ahala; eta are gehiago Siberiako eta Alaskako
itsasertzetarantz joanez gero.



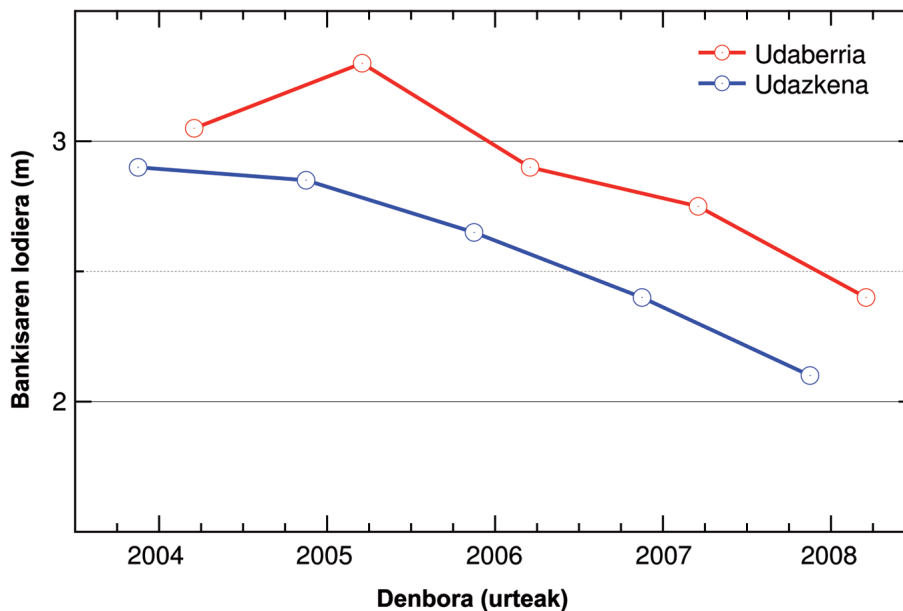
11. irudia. ICESat-en bidezko itsas izotzeko frankobordoren balioesp-
ena 2003ko martxoan (Iturria: Skourup, 2010).

Ozeano Artikoko bankisaren beherakada: behaketak berrikusten, kausa fisikoak ulertzen eta etorkizuneko aldaketak iragartzen

ICESat bost urtez egon da martxan, eta Ozeano Artikoaren 10 laser-neurketa egin ditu denbora horretan: bost martxoan, bankisaren hedadura handieneko garaian, eta bost irailean, izotzaren hedadura txikieneko garaian. Adibide bat ikustearren, 12. irudiak erakusten digu izotz-lodieraren banaketa espaziala neguan. Banaketa hori 11. irudikoaren antzekoa da, baina bankisaren lodieraren arabera da hau, frankobordoaren arabera izan ordez. Irudiak erakusten du izotz-geruza lodiena (5 m edo gehiagokoa) duen eremua asko txikiagotu dela epe horretan. 13. irudian, Artiko osoko batez besteko izotz-lodierak ematen ditu, datu horietatik eta irailekoetatik ateratakoak, eta bistakoa da azken lau urteotan asko mehetu dela:



12. irudia. Neguko bankisaren lodieraren eite espaziala, ICESat neurketen arabera (Iturria: Kwok *et al.*, 2010).



13. irudia. ICESat neurketetan oinarritutako Ozeano Artikoko itsas izotzaren argaltzea 2004-2008 tartean ICESat-en bidezko neurketen arabera. (Kwok *et al.*, 2010, artikulutik egokituta).

2,9 m-tik 2,2ra; hots, 0,2 metro urtean. Egia da behaketa horien denboratartea oso laburra dela klimari buruz ezer esateko, baina egia da, halaber, joera hori bera (bankisaren mehetze handi samarra) hautematen dela itsaspekoek azkeneko hamarkada batzuetan bildu dituzten datuetan ere. Espaziotik eginiko behaketak oinarri bat hartzen ari dira, eta alor hori prest dago jada aurrerapauso bat gehiago egiteko. Izan ere, CryoSat-2 eta IceBell misioa martxan daude jada, eta beste batzuk laster jarriko dira.

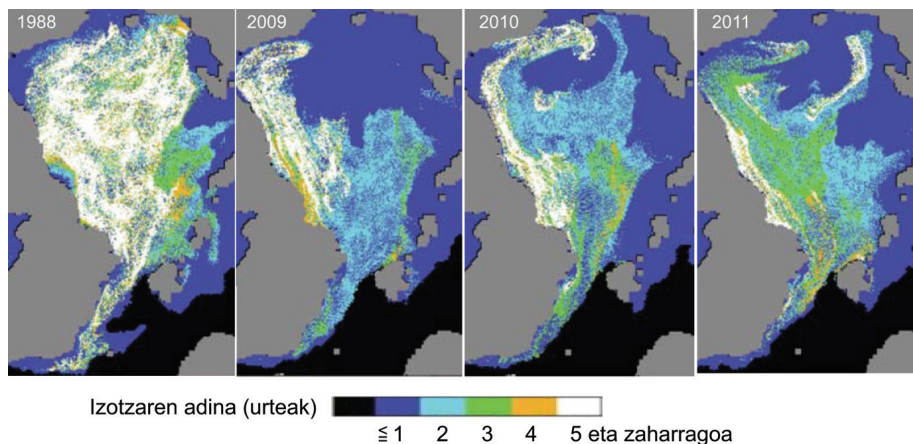
Laburbilduz, itsaspekoen datuek eta, batez ere, azken urteetan espaziotik egindako neurketek adierazten dute bankisa abiadura handian ari dela mehetzen. Eta mehetze hori lehen ikusi dugun bankisaren hedaduraren murrizteari gehitu behar zaio. Orain, Artikoan dauden bi izotz motak ikusiko ditugu: urtaroko izotza eta izotz iraunkorra. Ikertu nahi dugu ea izotzaren mehetzea fenomeno orokorra den ala izotz mota bakoitzari ezberdin eragiten dion.

Bankisa gatzetzen ari da

Artikoko bankisa bi kategoriatan banatu daiteke adinaren arabera: urtaroko izotza eta izotz iraunkorra. Bankisak urte-sasoi bat igaro duen ala ez, hortxe dago ezberdintasuna. Bi izotz mota horiei «lehen urteko izotza» eta «urte askoko izotza» ere esaten zaie, hurrenez hurren. Lehen urteko izotza udazken hasieran hasten da eratzen (termodinamikoki) bazterreko lekuetan, eta oso azkar loditzen da neguan (2 m lodi izatera irits daiteke). Lehen urteko izotz horren zatirik handiena erabat urtuko da udan, baina zati txiki bat bere horretan geratuko da, eta urte askoko izotz bilakatuko da. Lehen urteko izotzaren aldean, urte askoko izotzak hazkunde-tasa motelagoa du, 40 cm/urte ingurukoa besterik ez (Maykut eta Untersteiner, 1971). Urte askoko izotza dinamikoki ere handitu daiteke, haizeak eta lasterrek izotzmantuak bata bestearen gainean pilatzen badituzte «pilatze» eta «tontortze» prozesuen bidez. 5 m lodi edo gehiago izatera irits daiteke. Urte askoko izotzak hamar bat urte iraun ditzake Ozeano Artikoan, prozesu termodinamikoaren (haztea eta urtezea) eta indar dinamikoen (haizea eta ozeanoko zirkulazioa) arabera. Urte askoko izotza lehen urteko izotza baino askoz lodiagoa denez, kanpoko indar horien aldaketen aurrean gogorragoa ere bada. Horregatik, Artikoan urte askoko izotzaren zer kantitate dagoen baldin badakigu, bankisa-estalduraren osasunaren adierazle bat izango dugu.

Artikoko izotzaren adinari buruzko datuak 80ko hamarkadatik daude eskuragarri. Satellite bidezko irudietan izotzezko multzoei jarraitzean datza. 14. irudian, adin ezberdinetako bankisak hainbat garaitan izan duen banaketa espaziala ageri zaigu, eta nabaria da urte askoko izotzak azken urteotan zer galera pairatu duen (Maslanik *et al.*, 2011). Ez da harrizkoa izotz zaharrenaren kokapen geografikoa eta izotz lodienarena bat etortzea (12. irudia). Izotzaren adinaren arabera aldaketa horren datu-serie kro-

Ozeano Artikoko bankisaren beherakada: behaketak berrikusten, kausa fisikoak ulertzen eta etorkizuneko aldaketak iragartzen



14. irudia. Bankisaren adinaren joeraren espazio-banaketa. (Maslanik *et al.*, 2011, artikulutik egokituta). Make it consistent with caption of Figure 13.

nologikoa aztertzen badugu, ikusiko dugu izotz zaharrena (lau urte edo gehiagokoa) 2005ean hasi zela txikiagotzen, eta 2011ko udan iritsi zela gutxieneko baliora. Izotz zaharrenaren galera garbia % 19koa da abiapuntu 1982-2005 bitarteko batez besteko balioarekiko (Maslanik *et al.*, 2011). Urte askoko izotz zaharren galeraren adinaren arabera ezberdina bada ere, Artikoko bankisa gero eta gazteagoa da, oro har.

Ikusi dugun guztia laburtzeko, esan dezakegu Artikoko bankisa txikitzen, mehetzen eta gaztetzen ari dela, argi eta garbi. 2005. urteaz geroztik, Artikoko bankisak eskura ditugun datuen artean baliorik txikiak eman ditu parametro horietan guztietan, eta abiadura handia hartu du. Horrek iradokitzen du Ozeano Artikoaren sistemak egoera berri batera jauzi egin duela, non bankisaren lodiera eta udako hedadura etengabe ari baitira murrizten. IPCCren 2007ko Txosteneko klima-ereduak (ikus behean) oso motz geratu ziren bankisaren galerari buruzko kalkuluetan. Izotza (urte askoko izotza, batik batik) urtuz doan heinean, aukera gehiago daude etorkizuneko ere urtzen jarraitzeko. Galdera hau da: zerk eragin du beherakada izugarri hau eta zergatik gutxietsi dute ereduak? Hurrengo ataletan helduko diogu galdera horri.

BEHAKETETAN HAUTEMANDAKO BANKISA-GALERA ULERTZEN

Ozeano Artikoan gertatu berri diren aldaketen eragileak aztertzean, susmagarri bat baino gehiago agertzen dira. Ikusitako aldaketen atzean zer dagoen jakiteko, ezin dugu pentsatu bankisa bere inguruetik isolatuta dagoen

elementu fisiko bat denik (nahiz eta goian hala irudikatu dugun funtsean); bankisa Artikoko sistemaren osagaia da, alboko bi elementurekin (goiko atmosferarekin eta beheko ozeanoarekin) energia- eta momentu-trukean ari dena etengabe.

Bankisaren eboluzioa gobernatzen duten prozesu fisikoak bi kategoriatan banatzen dira, eskuarki: termodinamika eta dinamika. Lehenengoak beroa edo erradiazioa transferitzen du, eta izotza haztea edo urtzea dakar. Baina bankisa ez da toki batean, besterik gabe, hazten edo urtzen. Aitzitik, haizeak, ozeanoko lasterrek eta halako prozesu dinamikoek izotza batera eta bestera mugitzen dute, bai eta formaz aldatu ere. Sinplifikatuta, esan daiteke termodinamikak prozesu bertikalak hartzen dituela, eta, dinamikak, berriz, prozesu horizontalak. Hori horrela, prozesu termodinamikoek eta dinamikoen bidez ozeanoarekin eta atmosferarekin izandako interakzioek eta berrelikadura positibo eta negatiboko hainbat zirkuituk eragiten dituzte aldaketak izotz-geruzan. Testuinguru orokor horren barruan ulertu nahi ditugu bankisak izan dituen aldaketak. Banan-banan azalduko ditugu.

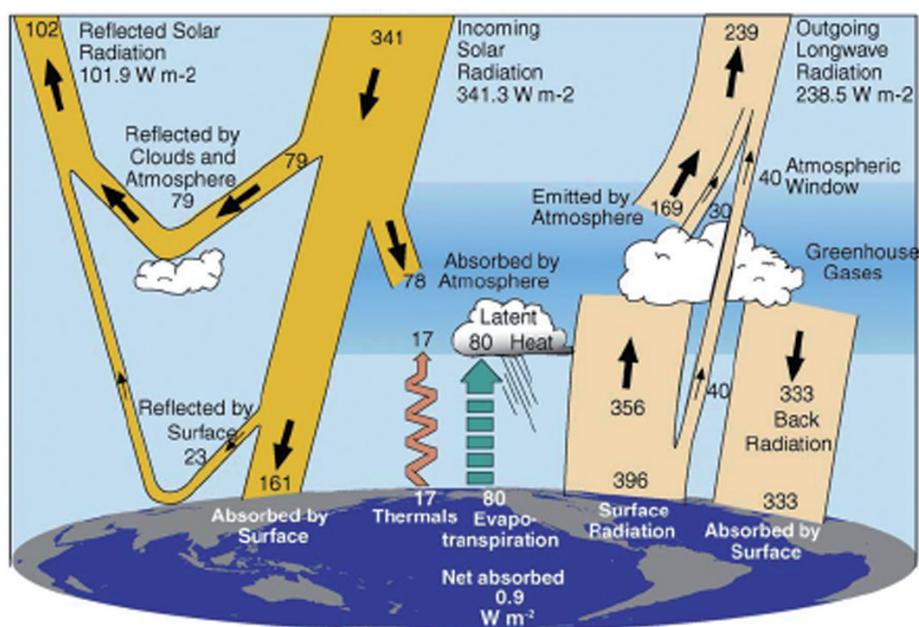
Prozesu termodinamikoak

Modu sinpleenean esateko, bankisa hazten hasten da ozeanoaren gainazalaren tenperatura izozte-puntura iristen denean (zero azpitik $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ da ur gaziarena), eta urtzen hasten da tenperatura izozte-puntutik gora igotzen denean. Izatez, ordea, bankisaren bero-balantzeak agintzen du zer izotz kantitate eratu ala urtuko den eta zer abiaduratan. Bero-balantzea ateratzeko, izotza haztea edo urtzea eragiten duten energia-fluxu guztiak batu behar dira, izotzaren azalean eta hondoa trukatzeko den beroa eta bere barruan barrena dabilena barne. Sistemak beroa hartzen duenean, berotu egiten da, eta izotza urtu egiten da. Eta, sistemak beroa galtzen duenean, hoztu egiten da, eta izotza hazi egiten da.

Hortaz, zer energia-fluxuk dute eragina? Izotzaren gainazalak, atmosferarekin kontaktuan dagoenez, eguzkiaren eta atmosferaren erradiazioa jasotzen ditu, bai eta airearekiko kontaktu horretatik sortzen den bero sorra eta bero sentikorra trukatu ere. Faktore horien artean, erradiazioa da garrantzitsuena, dudarik gabe. Eguzkitik datorren uhin laburreko erradiazioa hein batean islatu eta transmititu egiten da, eta hodeiek, atmosferak eta izotzak xurgatu egiten dute. Xurgatzen den zati hori berriz igortzen da (uhin luzeko) erradiazio atmosferiko gisa. Bero sorra eta bero sentikorra («fluxu turbulentu» izenez ere ezagunak) askoz txikiagoak dira, eta haizeak eragin handia du haietan, bai eta izotzaren eta atmosferaren arteko kontaktuan dauden tenperatura- eta hezetasun-ezberdintasunek ere. Izotzaren behealdean, ozeanoa ukitzen duen zati horretan, ozeanoak izotzari igortzen dion bero-fluxua besterik ez dago. Eta, bi kontaktu-puntuen artean eta izotz barnean, bero-eroapena dago.

Ozeano Artikoko bankisaren beherakada: behaketak berrikusten, kausa fisikoak ulertzen eta etorkizuneko aldaketak iragartzen

Energia-fluxuak asko alda daitezke denboran eta espazioan, funtsezko eragile batzuen menpe baitaude: gainazaleko elurraren eta uraren (elur urtuaren) kantitatea, izotzaren lodiera, toki jakin bateko izotz-kontzentrazioa eta hodei-estaldura, besteak beste. Esaterako, har dezagun albedoa. Eguzkitik datorren erradiazioaren eta espaziora islatzen denaren arteko zatidurari deritzo albedo. Albedo oso ezberdina izan daiteke (izotz hutsak jasotako erradiazioaren % 65 islatu dezake; elurrez estalitako izotzak, % 85; eta itsasoko urak, % ~7 besterik ez), eta ezberdintasun horiek sekulako eragina dute bero-balantzean. Gainera, atmosferako eta ozeanoko zirkulazio orokorrak bero sorra eta sentikorra eramaten dituzte beheko latitudeetatik Artikora; Ipar Atlantikotik eta Ozeano Pazifikotik eramaten dute beroa. Kontu horiek ere aintzat hartu behar dira energia-fluxuak kalkulatzeko orduan.



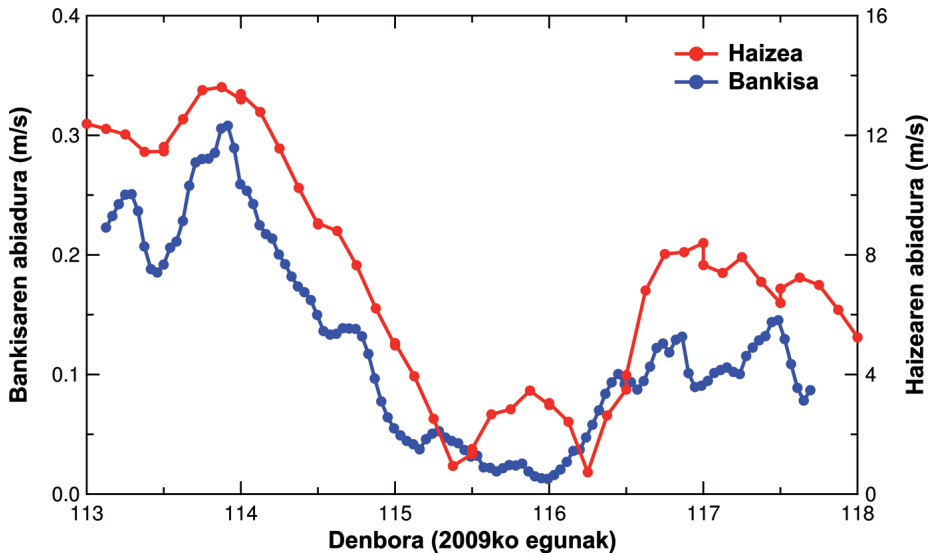
15. irudia. Mundu osoko energiaren urtean zeharreko batez bestekoaren balantzea, W/m²-an adierazita. Gezien lodiera energia-fluxuaren garrantziaren arabera kalkulatu da (Iturria: Trenberth *et al.*, 2009).

Efektu eta ondorio guztiak zehatz-mehatz kalkulatzeko ez da lan erraza. Zailtasun horretaz jabetzeko, gutxi gorabehera kalkulatu dugu zenbat energia baliatzen den izotza hazten eta urtzen denean. Zehazki, behaketetan ateratako datu bat hartuko dugu erreferentziatzat —bankisaren lodiera ~10 cm/urte mehetzen dela (ikus goian)—, eta urtze-maila horretara heltzeko zenbateko beroa behar den kalkulatu dugu. Bero-fluxua

(edo azalera-unitateko iragaten den bero-jarioaren abiadura) aise kalkula daiteke, bi gai hauek biderkatuz: 1 m²-ko azalerako 10 cm-ko izotzezko zutabe baten masa (izotzaren dentsitatea bider izotz-galeraren abiadura; hots, 925 kg/m³ × 0,1 m³/urte) eta uraren fusioko bero sorra (334 kJ/kg). Emaitza 30 MJ/urte da, gutxi gorabehera, edo 1 W. Hau da, Ozeano Artiko bankisaren azken urteotako beherakada hori gertatzeko, haren azalera-unitate bakoitzeko bero-energiaren transferentzia 1 W/m² ingurukoa izan behar zuen. Goian aipatutako beste faktoreen ekarpena kontuan hartzen saiatzen bagara, ohartuko gara eguzki-erradiazioaren ekarpena, adibidez, ehunka W/m²-koa izan daitekeela (ikus 15. irudia). Beraz, bistakoa da beherakada horren zergatiak ulertzea behaketen eta eredu bidez bete beharreko erronka handia dela.

Prozesu dinamikoak

Bankisaren higadura- eta deformazio-prozesuari dinamika deritzo. Izotzaren higadura eta deformazioa hainbat faktorek eragiten dute: inertzia, haizearen azaleko trakzioa, azpiko azalean ozeanoak eragiten duen trakzioa, Coriolisen indarra, itsas gainazalaren inklinazioa eta izotzaren deformazioak eragindako barne-indarrak. Faktoreon artean, haizea da indartsuena, eta ozeanoko lasterrek ere badute indarra, txikiagoa bada ere. 16. irudian ikusten da haizearen abiaduraren aldakuntza eta bankisaren



16. irudia. Izotzaren gainean bidaiatzen duen doitasun handiko GPSaren bidez neurtutako itsas izotzaren abiadura eta haizearen abiaduraren aldakortasunaren arteko korrelazioa. Ohar zaitez ardatz bertikaleko eskala-aldaketaz. (Elosegui *et al.*, 2009, artikulutik egokituta). Make it consistent with caption of Figure 13.

*Ozeano Artikoko bankisaren beherakada: behaketak berrikusten,
kausa fisikoak ulertzen eta etorkizuneko aldaketak iragartzen*

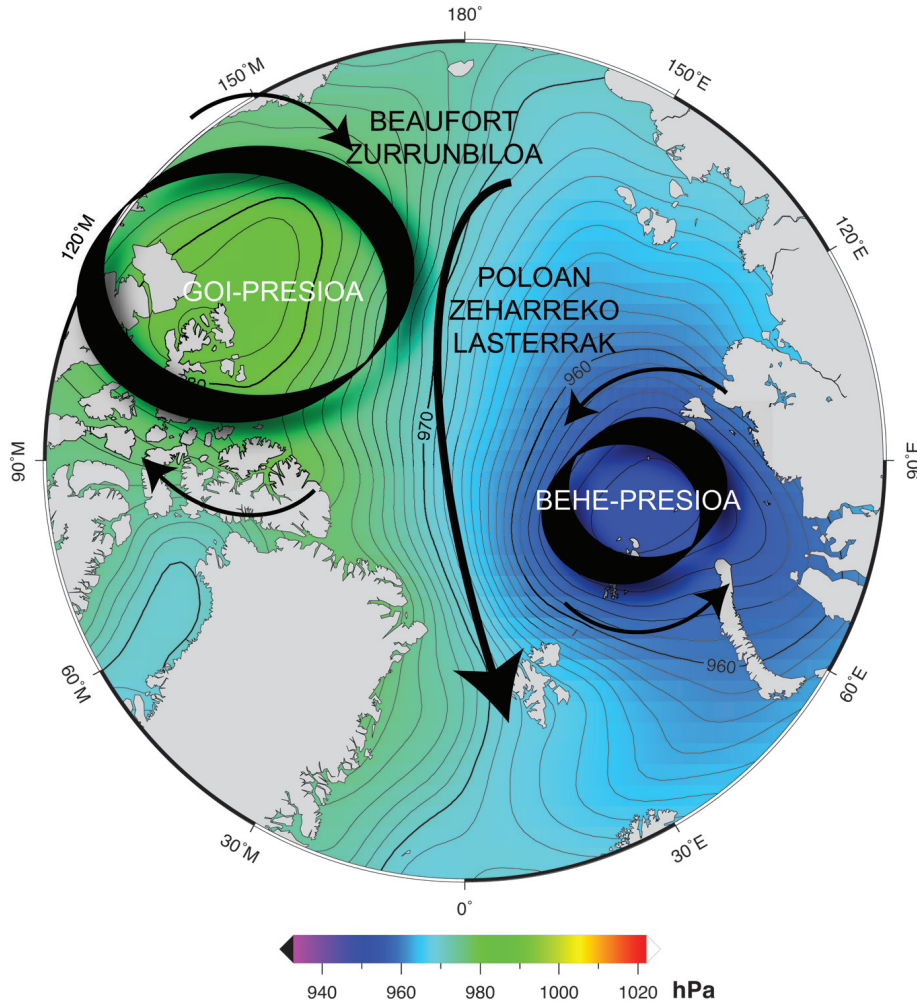
abiaduraren aldakuntza oso antzekoak direla. Ozeano Artikoko eremu batean (Groenlandiaren iparraldean) eginiko dinamika-esperimentu batetik ateratako datuak dira.

Dinamikak efektu handia du bankisaren lodieran ere, oso azkar aldatu baitaiteke hara eta hona dabilenean. Adibidez, izotz-konbergentzia dagoenean, bankisa eratu berriek, bata bestearen gainean pilatuz, tontorrek osa ditzakete, eta lodiera bikoiztera irits daitezke. Izotz-dibergentzia dagoenean, aldiz, itsaso zabalak kentzen dio tokia bankisari. Zer eredu hartzen dute Ozeano Artikoko bankisaren konbergentziak, dibergentziak eta batez besteko jitoak?

Eskala handiko higiduraren ereduari zirkulazio deritzo. Bankisaren higidura nagusiki haizeak eragindakoa denez eta haizea presio atmosferikoko ezberdintasun horizontal batek eragiten duenez, Ozeano Artikoko bankisaren zirkulazioak lotura handia du Artikoko itsas mailako presio-eremuarekin. Jakina, gauza bera gertatzen zaio ozeano-gainazaleko zirkulazioari.

Artikoko presio-eremuaren bereizgarria goi- eta behe-presio erdiiraunkorreko ereduak da. Eremu horren ezaugarri nabarmen bat Beaufort Itsasoan dago, Artikoko mendebaldean. Han, bada goi-presioko eremu bat, neguan gorenko mailara iristen dena. 17. irudian, 2009ko apirilko astebe-tean neurtutako batez besteko itsas mailako presio-eremua agertzen zaigu; aldi horretako ezaugarri nagusia da goi-presioa dagoela Beaufort Itsasoaren hegoaldean eta behe-presioa Siberiako plataforma kontinentalean. Coriolisen efektua dela eta, haizea presio atmosferikoaren isobarekiko paraleloan mugitzen da; presio atmosferikoa handia denean, antizikloiaren noranzkoan (edo ordulariko orratzen noranzkoan ipar-hemisferioan) mugitzen da; presio txikia denean, berriz, zikloiaren noranzkoan. Bankisak (eta ozeanoaren gainazalak) haizearen bultzada jasaten duenez, Ozeano Artikoko zirkulazioa bi lasterren menpe dago. Batetik, Beauforteko Zurrumbilo antiziklonikoak Artikoko biraka jartzen du bankisa, Groenlandiarantz eta Kanadako Uhartedi Artikorantz bultzatzen du, eta konbergentzia sortzen da horren ondorioz. Bestetik, Poloan Zeharreko Lasterrak Siberiar Artikoko bankisa Ipar Polorantz eramaten du, eta handik Ozeano Atlantikoraino, Framen Itsasartetik pasatuta.

Bankisaren zirkulazioa oso aldakorra izan daiteke, bai epe labur samarreko eskaletan (itsas mailako presioaren aldaketak eraginda), bai klima-azterketetarako interesgarriak diren eskaletan. Artikoko sistemako klima-aldakortasuna azaltzeko, Artikoko Oszilazioa (AO) indizea erabil daiteke (Thompson and Wallace, 1998). Klimatologoek erreferentzia hori erabiltzen dute Ipar Hemisferioko itsas mailako presio-eremuan gertatzen diren aldakuntzak (urtarokoez bestelakoak) zenbaterainokoak diren kalkulatzeko. AO indizea positiboa edo negatiboa izan daiteke. Indize negatiboak adizterera ematen du gainazaleko presioa Artikoko presio normala baino handia-

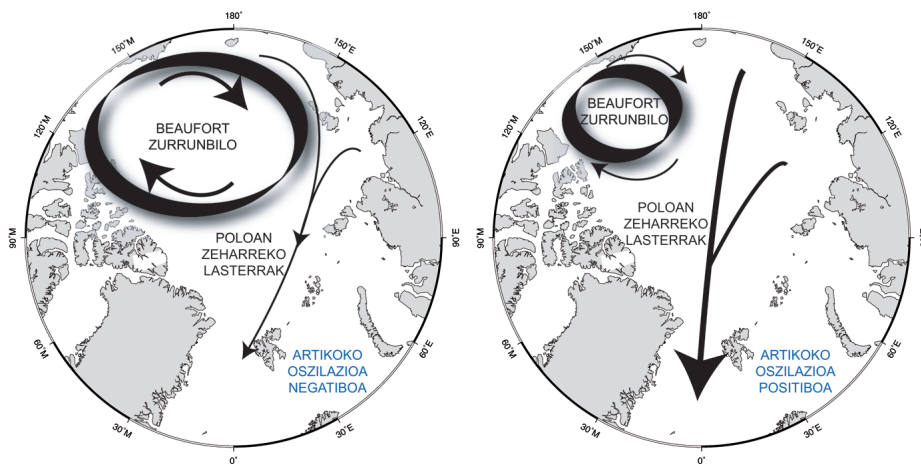


17. irudia. 2009ko Apirilean Beaufort gunean itsas mailako presioan antizikloia dago eta Siberiako plataforman zikloia. (Elosegui *et al.*, 2009, artikulutik egokituta). Make consistent with caption Figure 13.

goa dela eta latitude ertainetako presio normala baino txikiagoa; positiboak alderantzizkoa esan nahi du. AO indizean aldaketak izanez gero, bankisaren zirkulazioan ere aldaketak izango dira, eta horrek eragina izango du izotzaren kontzentrazioan, adinean eta lodieran.

18. irudian ageri zaigu Artikoko bankisaren zirkulazio orokorra nolakoa den AO positiboa denean eta nolakoa den negatiboa denean. Batez ere, Beauforteko Zurrunbiloaren tamainak eta Poloan Zeharreko Lasterrak eragiten dute bi egoeren arteko aldea. AO negatiboa denean —presioa

Ozeano Artikoko bankisaren beharakada: behaketak berrikusten, kausa fisikoak ulertzen eta etorkizuneko aldaketak iragartzen



18. irudia. Zirkulazio patroiak Artiko Ozeanoan Artikoko Oszilazioa indizea negatiboa eta positiboarekin.

normala baino handiagoa delako eta haize antiziklonikoak direlako nagusi Artikoan—, Beauforteko Zurrumbiloa azkartu eta zabaldu egiten da eta Poloan Zeharreko Lasterra okertu egiten da. Egoera horietan, bankisa luzarago egon ohi da Ozeano Artikoan eta loditu egiten da (Rigor *et al.*, 2002). AO positiboa denean, Beauforteko Zurrumbiloa baretu eta txikiagotu egiten da, eta Poloan Zeharreko Lasterrak zuzen-zuzenean zeharkatzen du Ipar Poloa. Egoera horietan, bankisa gehiago kanporatzen da Framen Itsasartetik Ozeano Atlantikoraino (Rigor *et al.*, 2002). Horrenbestez, oro har, esan daiteke AO positiboak Ozeano Artikoko bankisa kantitatea murrizten duela eta negatiboak guztiz alderantzizkoa egiten duela.

Bankisaren beharakadaren kausa onargarriak

Aurreko lerroetan, marko fisikoa azaldu dugu bankisaren galera handiaren kausak zehazteko asmoz, eta, orain, azalpen horiek bateratzeari ekingo diogu. Bankisa-galeraren eragile onargarriak termodinamika- eta dinamika-prozesuei eragiten dien faktoreetan aurkituko ditugu, noski. Faktoreen artean, hauek aipa ditzakegu, besteak beste: berotze globalaren joerak, ozeanoko uretara iristen den eguzki-erradiazio areagotua, hodei-estalduraren aldaketak, Ozeano Atlantikoko eta Pazifikoko uretatik datorren bero-adbekzioa, Artikoko oszilazioaren aldaketak eta bankisaren esportazioaren gorakada. Faktore horiek nola eragiten duten aztertuko dugu orain.

Artikoa berotzen ari da, inolako zalantzarik gabe. Gainera, latitude txikiagoetako lurrak baino azkarrago ari da berotzen (gogoratu lehen aipatu dugun Artikoko Anplifikazioa). Berotze fenomenoaren adierazle bat

gainazaleko airearen tenperatura da («surface air temperature» edo SAT, ingelesez), eta tenperatura horrek gora egin du Artikoan 1960ko hamarkadaren erdialdetik (Overland *et al.*, 2011). Esaterako, Ozeano Artikoaren zatirik handienez, 2011. urteko batez besteko tenperatura $\sim 1,5$ °C handiagoa da aurreko 30 urteetako batezbestekoa baino; eta Artikoaren mendebaldeko partearen batezbestekoak konparatuz gero, aldea are handiagoa da, ~ 3 °C-koa. Berotze-fenomenoa aldakortasun naturalak eragiten du, hein batean, baina beroaren eta hezetasunaren garraioak ere bai; izan ere, berotzen ari diren Ekuatore aldeko eremuetatik polo aldera garraiatzen dira zirkulazio atmosferiko globalaren barruan (Döscher *et al.*, 2009). Gainazaleko airearen tenperatura bereziki altua denean, bankisan asko igartzen da, neguan izotza gutxiago haztea eta udaberrian eta udan azkarrago urtea baitakar. Bi efektuok bat egiten dutenean, urtegaraiia luzatu egiten da eta gainazaleko izotza gehiago urtzen da; horrek ere bultzatzen dubankisaren beherakada. Adibidez, 1980ko hamarkadatik 1990eko hamarkadara bitartean, Ozeano Artiko osoko urtegaraiia luzatu egin da; Artikoaren Erdialdean jasotako ~ 5 egun/hamarkada baliotik (balio txikiena) Barents Itsasoan jasotako ~ 17 egun/hamarkada baliora (handiena) (Stroeve *et al.*, 2006). Eta bankisa-galerak berak ere airearen tenperatura berotzen du. Hala, elementu baten aldaketak besteei eragiten die (eta ondorioa areagotzen die kasu honetan), eta ziklo bat sortzen da, «berrelikadura positiboko zirkuitu» izenekoa. Berrelikadura positiboko zirkuituak oso interesgarriak dira, noski, klima-azterketetarako, asaldura txiki bat anplifikatu egin baitaiteke eta eraldaketa handi bat sortu.

Azaldu berri dugun berotze-faktore horri oso lotuta dago beste gertaera hau: ozeanoa berotu egiten da eguzki-erradiazio areagotuaren ondorioz. Bankisa gutxiagotu ahala, ozeano-azal gehiago jartzen da esposiziopean, eta ozeanoak eguzki-bero gehiago gordetzen du, izotzaren eta elurraren albedoa baino askoz albedo txikiagoa du eta. Egia esanda, bi albedoen arteko aldea muturrekoa da: elurrarena % 85koa da, eta ozeanoarena, % 7koa. Islagailu natural onena dugu bat, eta txarrenetarikoa bestea. Ozeanoaren gainaldeak bero gehigarria xurgatzen duenean, bankisaren hondoa gehiago urtzen da, eta itsasoak hartzen dio tokia bankisari. Orduan, eguzkiaren berotze areagotuak indar handiagoa hartzen du eta izotz gehiago urtzen du. Hala, izotz-albedoaren beherakadaren berrelikadura positiboak ez du etenik. Gerta liteke, halaber, izotzaren gainaldea urtuz eta urtuz joan eta putzuak eratzea (ikus 19. irudia), urtegaraiak luzatzen direnean batik bat; horrek ere bultzatzen du izotz-albedoaren berrelikadura positiboa. Gainera, hondoa urtzearen ondorioz mehetutako izotz-geruzak lodiak baino eguzki-erradiazio handiagoa eroaten du ozeanora, ozeanoaren goialdea gehiago berotzen da, eta izotz gehiago urtzen da hala (Perovitch *et al.*, 2008). Adibidez, behaketetan ikusi da 2007ko udan itsas gainazalaren tenperaturak irregularitasun handiak izan dituela, 5 °C-rainokoak (Steele *et al.*, 2008); alde horrek izotza 75 cm mehetuko zuela kalkulatu da. Izotz-geruza

Ozeano Artikoko bankisaren beherakada: behaketak berrikusten, kausa fisikoak ulertzen eta etorkizuneko aldaketak iragartzen



19. irudia. Urtutako putzuek izotzaren urtzea areagotzen dute berrelikadura zirklo-positiboa dela-medio (Iturria: P. Eloseguiaren argazki bilduma).

meheagoaren eta itsaso-eremu zabalen (urteko batez bestekoa baino sei aldiz balio handiagoa hartu zuen, gutxi gorabehera) ondorioz, Beaufort Itsasoko bankisaren hondoa urtu egin zen garai hartan (Perovitch *et al.*, 2008).

Udako hodeiek ere badute eragin termodinamikoa bankisaren joeretan. Batetik, hodeiek babestu egiten dute izotz-geruza uhin laburreko eguzki-erradiazio zuzenetik, eta hoztu egiten dute hala. Bestetik, hodeiek uhin luzeko erradiazioa harrapatu egiten dutenez, gainazala berotzen dute, eta izotza urtzea dakar horrek. Hodei motak garrantzi handia du, antza, bi efektutako bat ala bestea nagusituko den erabakitzen duten faktoreen artean. Goi latitudeetan, fase likido eta fase nahasiko hodei baxuek eta hodei altuek gainazala berotzen dute ia urte osoan zehar, udaroko tarte txiki batean izan ezik (adib.: Intriari *et al.*, 2002). Artikoko hodeiek gainazalean duten efektu orokorra berotzea da; hala, izotza urtu egiten da, eta hezetasun handiagoa iristen da izotzik gabeko ozeano-eremu ireki berrietatik. Gainera, ozeanoaren gainazaleko uren lurruntze areagotuaren aldagai osagarriak hodei gehiago sor ditzake; horrek gehiago berotzen du gainazala eta urtzen du izotza, eta, katean-katean, berrelikadura positiboko beste zirkuitu bat osatzen da. 2000tik 2010era bitartean bankisa eta hodei-geruza aztertze egin ziren satellite bidezko behaketek erakusten dute bankisa-kontzentrazioaren % 1eko beherakadak hodei-geruzaren % $\sim 0,4$ ko igoera dakarrela (Liu *et al.*, 2009).

Beroaren adbezioak ere eragiten dio bankisari (Zhang *et al.*, 1998); izan ere, Ozeano Pazifikoko eta Atlantikoko beroa Artikora eramaten dute urek. Munduko beste ozeanoen ondoan, Ozeano Artikoa arro txiki bat da, lurrez inguratua ia erabat eta sakonera txikikoa. Hidrografiari dagokionez, hiru ur--geruza ditu, tenperatura eta gazitasun ezberdinekoak: Artikoko gainazaleko ura, Atlantikoko ura eta Artikoko hondoko ura. Artikokoaren zatirik handieneko bankisara heltzen den bero gehiena Atlantikoko urtetatik dator. Ekialdeko Framen Itsasertetik eta Barents Itsasotik sartzen da ur hori, barreiatu egiten da, eta geruza bat osatzen du 200-m eta 1000-m arteko sako-

neran. Artikoko azaleko urarekin alderatuta, Atlantikoko ura epela eta gazi da. Izatez, bankisa osoa urteko adinako beroa daroa, eta hala egingo luke haloklinagatik ez balitz. Haloklina Artikoko azaleko uraren geruza hotz eta gazi bat da, 50-m eta 200-m arteko sakoneran egon ohi da, eta oztopo fisiko bat ezartzen du. Ozeano Pazifikoko urek Atlantikokoan antzera jokutzen dute, baina Kanadako Arroan. Beringeko Itsasartetik sartzen dira, baina, Atlantikoko urak baino gezagoak eta epelagoak direnez, azaletik hurbilago geratzen dira. Ozeano Atlantikotik eta Ozeano Pazifikotik Artikora iritsitako uretan aurkitu izan dira ohi baino askoz tenperatura epelagoak, eta, beharbada, hor dago bankisa urtearen zergatia.

Lehen azaldu dugun eran, Artikoko Oszilazioak bankisaren zirkulazioa baldintzatzen du, eta, AO indizea aldatzen bada, Beauforteko Zurrunbiloa-
ren tamaina eta Poloan Zeharreko Lasterraren nondik norakoa ere aldatu egiten dira; horrek guztiak eragina du bankisaren kontzentrazioan, adinean eta lodieran. AO aldatzen bada, Artikora sartzen eta Artikotik irteten den uraren arteko erlazioa aldatu egiten da; hots, AOk balio positibo altua ematen badu, Atlantikoko ur epel gehiago sartzen da Barents Itsasora eta Artikoko ur hotz gehiago irteten dira Framen Itsasartetik. AOren aldaketak Ozeano Atlantikoko eta Ozeano Pazifikoko haloklinen aurrealdeko kopapena ere aldatzen du. Ur-masen banaketa berri horrek ahuldu egiten du haloklina, eta bankisa hondotik urtzen hasten da (Steele and Boyd, 1998). 1989tik 1996ra bitarteko aldia AO indize positibo altukoa izan zen; bada, Atlantiko ur epelak Ipar Polorainoko bide osoan aurki zitezkeen, baita harago joanda ere (Morison *et al.*, 2006).

AO indizearen eragina ez da tarteko uretara mugatzen; goian azaldu bezala, Artikoko bankisaren kantitatean ere badu zeresanik. Oro har, AO indize positiboak Ozeano Atlantikora bankisa gehiago eramatea dakar, eta horrek murriztu egiten du Ozeano Artikoko bankisa kantitatea; AO indize negatiboak justu kontrako eragina du. 1990eko hamarkadatik, joera orokor argi bat nabari da: gorakada izotzaren kanporatzean (Kwok *et al.*, 2009) eta bankisaren higiduran (Rampal *et al.*, 2009). Aldi horretan bankisa mehetu ere egin denez, izotza mugikorrango bilakatu zen, beharbada.

2007ko udak Ozeano Artikoko klima eraldatu zuen

2007ko irailean, bankisaren hedadura ez zen 4.200.000 km²-ra iristen; inoizko jasotako baliorik txikiena izan zen hori. Atzerapen hori oraindik ere ikertzen ari diren arren, oinarriko azalpena da hainbat faktore hauek berderen izan zutela eragina galera ikaragarri horretan: bankisaren aurrebaldintzapena, atmosferaren nahiz ozeanoaren berotzea eta izotz-albedoaren berrelikadura.

AO positiboaren ondorioz izotz iraunkor gehiago kanporatu zelako gertatu zen aurrebaldintzapen hori, eta berotze-joeren ondorioz murriztu

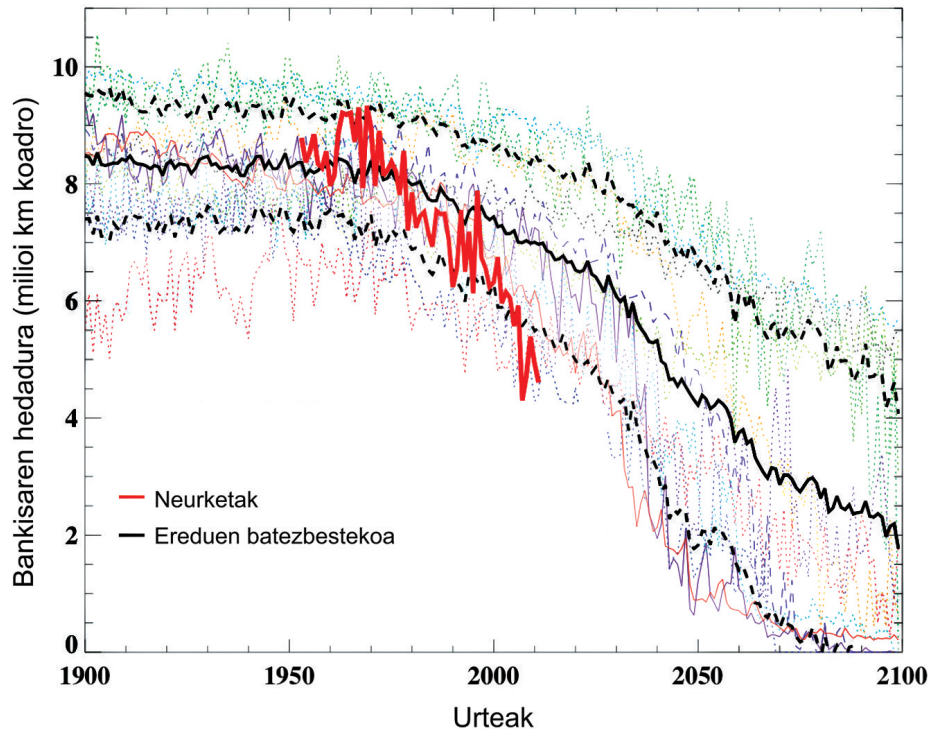
zen pixkanaka izotza, nola hedadura aldetik, hala lodiera aldetik. Bankisa gazteagoa, meheagoa eta txikiagoa izanda, prestatuta zegoen jada galera gehiago izateko, eta sentiberago zegoen atmosferako nahiz ozeanoko kondizioetako fluktuazio naturalekiko. Orain badakigu zenbait faktore dinamiko eta termodinamikok izan zutela beren parte ahuldutako izotz-geruzaren galera ikaragarri horretan. Faktore horien artean daude, besteak beste, zirkulazio atmosferikoko kondizioak (Stroeve *et al.*, 2008), hodeimurrizketa (Kay *et al.*, 2008), Ozeano Pazifikokoaren iparraldeko uretatik garratutako beroa (Shimada *et al.*, 2008), izotzaren dibergentzia (Steele *et al.*, 2008) eta izotz-albedoaren berrelikadura (Perovitch *et al.*, 2008).

Bankisa ez da lehengo egoerara itzuli 2007z geroztik. 2011ko iraileko hedadura azken 30 urteotako bigarren txikiena izan da. Eta iraileko bost izotz-hedadura txikienak azken bost urteotan jaso dira. Urte askoko bankisa iraunkor lodiagoaren kantitateak ere gainbeheran jarraitu du. Bankisaren beherakada ondo finkatutako ondorioa da jada. Bankisa meheagoa izanda, era berean, ozeanoaren goialdeko ura epeldu egin da. Ozeanoaren zirkulazio antiziklonikoaren erregimenak gobernatu du Ozeano Artikoa gutxienez 14 urtez, 1997tik. Aitzitik, hori baino lehenagoko 50 urteetan, joera oso bestelakoa zen, ozeano-zirkulazioa 5-8 urtean behin aldatzen baitzen. Adierazle horiek eta beste batzuek aditzera ematen dute Ozeano Artikoko klima aldatu egin dela eta oso bestelakoa dela orain. Egoera hori egonkorra edo iragankorra da? Abian dauden ikerketek xedea da bai behaketak eta bai ereduak erabiltzea bankisaren beherakada handiaren kausak ulertzeko eta etorkizun hurbil eta urrunean izango dituen ondorioak aurreikusteko.

ETORKIZUNEKO ALDAKETAK

Artikoko bankisaren etorkizunak berebiziko garrantzia du klimarako eta ekonomiarako (ACIA, 2010). Ez da harritzekoa, beraz, Artikoko bankisaren akaberaren eta desagertzearen gaineko solasaldiak ohikoak izatea foro zientifikoetan nahiz hedabideetan. «Artikoa izotzik gabe geratuko ote da?», «Artikoko bankisa puntu erabakigarritik pasatuta ote dago jada?» (adib.: Duarte *et al.*, 2012) eta halako galderak nahiko ohikoak dira gaur egun.

Goiko lehen galderak uda amaieran bankisak duen hedadurari egiten dio erreferentzia, batez ere. Izan ere, urtaroko bankisak jarraituko du eratzten Artikoko negu hotzean etorkizun hurbilean. Etorkizunera begiratzean, klima-eredu errealistetatik ateratako aurreikuspenetara jo behar da. 20. irudian, eredu baten aurreikuspenak daude jasota: Artikoko bankisaren iraileko hedadurak xx. mendetik XXI. mendera bitarteko 200 urteetan. IPCCren AR4 txostenerako erabilitako atmosfera eta ozeano globaleko zirkulazio orokorreko ereduetatik (GCM) ateratakoak dira. Ereduen artean irregular-



20. irudia. Bankisaren iraileko hedaduraren ereduaren proiektzioak 200 urtetarako (20. eta 21. mendeetan zehar) eta azken 50 urteetako neurketak (Iturria: IPCC-ren 4. ebaluazio-txostena).

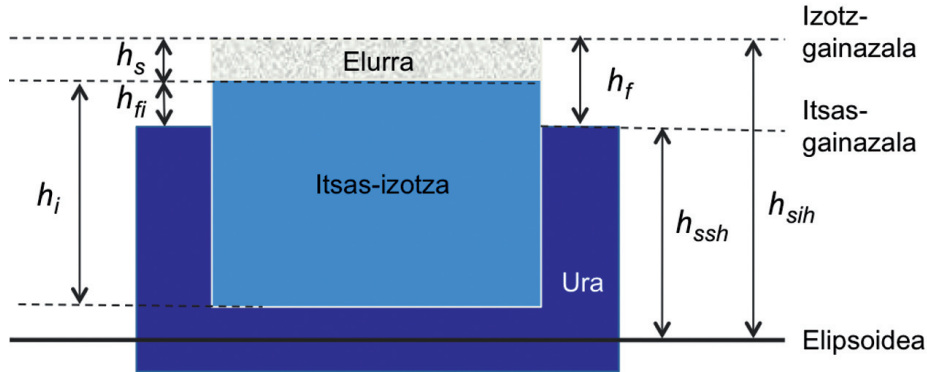
tasun handiak dauden arren, guztiek iragartzen dute mende honetan behar bada orokor bat izango dela bankisaren hedaduran. Eta eredu-tako batzuek iragartzen dute Artikoa izotzik gabe geratuko dela mendearen amaierarako. Behar bada, are harrigarriagoak dira IPCCren irudian ageri diren beste datu batzuk: azken 50 urteetako bankisaren hedadurari egini-ko satelite bidezko behaketan datuak, hain zuzen. Iragarpenak eta behaketak alderatuz gero, emaitza txundigarriak ateratzen dira. Behaketetan ikusitako bankisaren hedadurak txikiagoak dira azken hamarkadan eredu-aren bidez aurreikusitakoak baino. Hau da, gaur egungo ereduak aurrei-kusten dutena baino abiadura azkarragoan ari da murrizten bankisaren hedadura. Ereduak behaketak aurreikustean eginiko hutsegite horrek bi gauza jartzen ditu agerian: batetik, bankisa zeinen azkar ari den aldatzen; eta, bestetik, zeinen zaila den gertatzen ari den aldaketa horretan eragiten duten faktore fisiko guztiak ulertzea, harrapatzea eta eredu-tan sartzea. Alde hori berdintzea ezinbestekoa da klima globala behar bezala iragarri ahal izateko.

Behin honaino iritsita, badirudi galdera garrantzitsua hemen ez dela azken izotz-puska noiz desagertuko den, baizik eta Artikoko bankisaren beherakadak noiz izango duen eragina klima polarrean eta globalean. Eta erantzuna da dagoeneko ari dela eragina izaten. Lehen azaldu dugun eran, Ozeano Artikoko klima eraldatu da jada. Eta artikulu honetan Ozeano Artikoaz sistema fisikotzat bakarrik hartuta mintzatu bagara ere, sistema biologikoa, ekonomikoa eta politikoa ere bada. Bankisaren atzerakadak erasan dio jada izotzetako biotari (esaterako, hartz polarrei, itsas txakurrei, mortsei eta izotzetako algei), eta itsasoko ekosistemetan ere ari da aldaketak eragiten. Bankisaren atzerakadaren eta biotaren murriztapenen ondorioz, Inuiten eta Artikoko itsasertzeko beste komunitate batzuen kultura-jarduerak galtzeko arriskuan daude. Ozeanoak bankisa murriztua badu, sarriago izango dira trumoiak eta muturreko gertakari meteorologikoak. Era berean, aztertzen ari dira Artikoko bi nabigazio-igarobideak itsasontzien nabigazio-bidetzat erabili ote daitezkeen. Bankisaren beherakadaren berehalako ondorioa izan da, halaber, hidrokarbonoak eta beste baliabide natural batzuk ustiatzeko interesa piztea, eta horrek beste maila bateko arriskuak dakartzio ekologiarri. Eta, ildo horretatik, gatazkak sortu dira Ozeano Artikoaren subiranotasunaren eta zona ekonomikoen banaketa eksklusiboaren inguruan, eta gatazka horiek arriskuan jarri dute segurtasun nazionala. Laburbilduz, IPCCren bost kezka nagusiak, klima-aldaketa arriskutsuaren ingurukoak, ari dira gertatzen jada Artikoan (Duarte *et al.*, 2012). Argi dago Artikoko bankisaren beherakada hainbat erronka ari dela ezartzen alor sozioekonomikoan, politikoan eta ekologikoan.

ERANSKINA: FRANKOBORDO ALTIMETRIKOTIK BANKISAREN LODIERARA ARKIMEDESEN BITARTEZ

Bankisaren lodiera neurtzeko baliatzen diren behaketa altimetrikoen teknika nahiko berria denez, hemen azalduko dugu zertan datzan, labur-labur bada ere. Funtsean, espazioko altimetroek pulsu elektromagnetikoak (adib.: mikrouhinak edo laser-seinaleak) bidaltzen dituzte, eta uraren eta izotzaren gainazalerainoko joan-etorriko denborak neurtzen dituzte (itsasogainazala ikusi ahal izateko, pitzadura handiak izan behar ditu). Uhin elektromagnetikoak argiaren abiaduran mugitzen direnez, joan-etorriko denboretatik erraz atera daitezke gainazal islatzailearen (edo barreiatzailearen) garaierak erreferentzia komuneko gainazal baten gainean (elipsoidearen gainean) jarrita —elipsoidea irudi geometriko bat da, eta berak irudikatzen du ondoen (minimo karratuen zentzuan) Lurraren elipsoide-forma—.

Poloan erabiltzeko, ikus daitezkeen datu nagusia da uraren gainean dagoen izotzezko geruza edo «frankobordoa». Hori kalkulatzeko, bankisaren elipsoide-garaieraren (h_{sih}) eta itsasoaren gainazalaren elipsoide-garaieraren (h_{ssh}) arteko aldea atera behar da. Frankobordoaren neurketa hori, cm-tan



A1. irudia. Arkimedesen printzipioa itsas izotzeko frankobordoaren neurketara aplikatuta.

emana, erabil daiteke gero izotzaren lodiera ateratzeko, Arkimedesen printzipioa erabilia. Horretarako, pentsatu behar da oreka hidrostatikoa dagoela (eta, kasu honetan, errealista da, bankisak itsasoko uraren gainean flotatzen baitu) eta eskura izan behar dira izotzaren eta itsasoko uraren dentsitate-profilak (A1 irudia). Zailtasunak areagotu egiten dira Artikoko bankisak, normalean, elur-geruza mehe bat izaten duelako gainean, hainbat lodiera har ditzakeena. Bi kontu horiek aintzat hartuta, frankobordoa (h_f) adierazteko bide bat izotzeko (h_{fi}) eta elurrezko (h_s) frankobordo-garaieraren batuketa izan daiteke. Dentsitatea konstantea dela emanda, zuzenean aterako dugu izotz-lodieraren (h_i) adierazpen hau frankobordoaren neurketetatik:

$$h_i = \left(\frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_i} \right) h_f - \left(\frac{\rho_w - \rho_s}{\rho_w - \rho_i} \right) h_s$$

non ρ_i , ρ_s eta ρ_w , hurrenez hurren, izotzaren, elurraren eta uraren dentsitateak diren.

Argiago ikustearren, balio estandar batzuk erabiliko ditugu izotzarentzat eta urarentzat ($\rho_i = 925 \text{ kg/m}^3$ eta $\rho_w = 1.024 \text{ kg/m}^3$) eta elur-geruzaz ahaztu egingo gara. Orduan, izotz-lodiera hau aterako zaigu: $h_i = 10,34 h_f$. Esan nahi baita, Artikoko (urte askoko) izotzaren lodiera tipikoa hartzen badugu ($\sim 3,1 \text{ m}$, lehentxeago ikusi dugun eran), frankobordoa $h_f = 30 \text{ cm}$ da. Gainera, goiko ekuazioak erakusten du garrantzitsua dela elurraren sakonera zuzentasunez zehaztea, sekulako eragina baitu izotz-lodieraren gaineko kalkuluetan. Frankobordo baten kalkuluak egitean, elurraren sakonerrari balio txikiegia ematen bazaio, izotz-lodierari balio handiegia ematen zaio, eta alderantziz. Adibidez, elurrarentzat balio estandarrak erabiltzen baditugu $-\rho_s = 300 \text{ kg/m}^3$ eta $h_s = 30 \text{ cm}$ (Warren *et al.*, 1999)—, goiko

ekuazioko elurraren gaiak izotz-lodieraren balio kalkulatu txikiagotzen du, 2,19 m. Hau da, izotz hutsezko 30 cm-ko frankorbordo bat badugu, izotz-lodiera $h_i = 3,1$ m izango da, eta, elur hutsezko 30 cm-ko frankorbordoa badugu, berriz, $h_i = 31$ cm izango da; badago aldea!

Elurraren sakonera ezin da oraindik espazioko neurketen bidez atera, eta elurraren sakoneraren inguruko zalantzek eragiten dituzte hutsegite gehien izotz-lodiera kalkulatzeko orduan (Giles *et al.*, 2007). Gaur egun, elur-prezipitazioen, -metaketen eta -tontorren eredu meteorologikoen bidez eta/edo *in situ* neurketak eginda zuzentzen dira elur-lodieren kalkuluak.

ESKERRAK

Egileak eskerrak eman nahi dizkie Jon Saenzi eta Fernando Plazaolari (Euskal Herriko Unibertsitatea), idazki hau berrikusteagatik eta euskarakontuetan laguntzeagatik.

ERREFERENTZIAK

- CARSEY, F.D. (1992). «Microwave remote sensing of sea ice», Frank CARSEY (ed.). *American Geophysical Union, Geophysical Monograph* 68, 462 pp., Washington DC.
- COMISO, J.C.; C.L. PARKINSON, R. GERSTEN eta L. STOCK (2008). «Accelerated decline in the Arctic sea ice cover», *Geophys. Res. Lett.*, 35, L01703, doi:10.1029/2007GL031972.
- CORELL, R.W. eta C. CLEVELAND (2010). «Arctic Climate Impact Assessment (ACIA)», *Encyclopedia of Earth*. Eds. CUTLER, J. Cleveland (Washington, D.C.: Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment). ([http://www.eoearth.org/article/Arctic_Climate_Impact_Assessment_\(ACIA\)](http://www.eoearth.org/article/Arctic_Climate_Impact_Assessment_(ACIA))).
- DÖSCHER, R.; K. WYSER, M. MEIER, R. QIAN eta G. REDLER (2009). «Quantifying Arctic contributions to climate predictability in a regional coupled ocean-ice-atmosphere model», *Clim. Dynam.*, 34, 1,157-1,176.
- DUARTE, C.M.; T.M. LENTON, P. WADHAMS eta P. WASSMANN (2012). «Abrupt climate change in the Arctic», *Nature Climate Change*, 2, 60-62, doi:10.1038/nclimate1386.
- EISENMAN, I. (2010). «Geographic muting of changes in the Arctic sea ice cover», *Geophys. Res. Lett.*, 37, L16501, doi:10.1029/2010GL043741.
- ELOSEGUI, P.; S. HANSON, J. WILKINSON, R. FORSBERG, L. TUDAL, G. DYBKJR, S. OLSEN, H. SKOURUP eta J. DE JUAN (2009). «High-precision GPS measurements of anomalous high-speed sea ice drift in the Arctic Ocean», *Eos Trans.*, 90, C42A-05.

- GILES, K.A.; S.W. LAXON, D.J. WINGHAM, D.W. WALLIS, W.B. KRABILL, C.J. LEUSCHEN, D. MCADOO, S.S. MANIZADE eta R.K. RANEY (2007). «Combined airborne laser and radar altimeter measurements over the Fram Strait in May 2002», *Remote Sens. Environ.*, 111(23), 182-194, doi:10.1016/j.rse.2007.02.037.
- HUNKE, E.C.; W.H. LIPSCOMB eta A.K. TURNER (2010). «Sea-ice models for climate study: retrospective and new directions», *J. Glaciol.*, 56, 200.
- INTRIERI, J.M.; C.W. FAIRALL, M.D. SHUPE, P.O.G. PERSSON, E.L. ANDREAS, P.S. GUEST eta R.E. MORITZ (2002). «An annual cycle of Arctic surface cloud forcing at SHEBA», *J. Geophys. Res.*, 107(C10), 8039, doi:10.1029/2000JC000439, 2002.
- KAY, J.E.; T. L'ECUYER, A. GETTELMAN, G. STEPHENS eta C. O'DELL (2008). «The contribution of cloud and radiation anomalies to the 2007 Arctic sea ice extent minimum», *Geophys. Res. Lett.*, 35, L08503, doi:10.1029/2008GL033451.
- KWOK, R.; G.F. CUNNINGHAM, M. WENSNAHAN, I. RIGOR, H.J. ZWALLY eta D. YI (2009). «Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003-2008», *J. Geophys. Res.*, 114, C07005, doi:10.1029/2009JC005312.
- LAXON, S.; N. PEACOCK eta D. SMITH (2003). «High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region», *Nature*, 425, 947-950.
- LIU, Y.; J. KEY eta X. WANG (2009). «Influence of changes in sea ice concentration and cloud cover on recent Arctic surface temperature trends», *Geophys. Res. Lett.*, 36, L20710, doi:10.1029/2009GL040708.
- MAYKUT, G.A. eta N. UNTERSTEINER (1971). «Some results from a time-dependent, thermodynamic model of sea ice», *J. Geophys. Res.*, 76, 1550-1575.
- MANABE, S. eta R.J. STOUFFER (1980). «Sensitivity of a global climate model to an increase of CO₂ concentration in the atmosphere», *J. Geophys. Res.*, 85, 5529-5554.
- MASLANIK, J.; J. STROEVE, C. FOWLER eta W. EMERY (2011). «Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011», *Geophys. Res. Lett.*, 38, L13502, doi:10.1029/2011GL047735.
- MEIER, W.N. eta J. STROEVE (2008). «Comparison of sea ice extent and ice edge location estimates from passive microwave and enhanced-resolution scatterometer data», *Ann. Glaciol.*, 48(1), 65-70, doi:10.3189/172756408784700743.
- MORISON, J.; M. STEELE, T. KIKUCHI, K. FALKNER eta W. SMETHIE (2006). «Relaxation of central Arctic Ocean hydrography to pre-1990s climatology», *Geophys. Res. Lett.*, 33, L17604, doi:10.1029/2006GL026826.
- OVERLAND, J.; U. BHATT, J. KEY, Y. LIU, J. WALSH eta M. WANG (2011). «Temperature and Clouds» [in Arctic Report Card 2011 (<http://www.arctic.noaa.gov/reportcard>)].
- PEROVICH, D.K. eta B. ELDER (2002). «Estimates of ocean heat flux at SHEBA», *Geophys. Res. Lett.*, 9(9), 1344, doi:10.1029/2001GL014171.
- PEROVICH, D.K.; J.A. RICHTER-MENGE, K.F. JONES eta B. LIGHT (2008). «Sunlight, water, and ice: extreme Arctic sea ice melt during the summer of 2007», *Geophys. Res. Lett.*, 35, L11501.

- RAMPAL, P.; J. WEISS eta D. MARSAN (2009). «Positive trend in the mean speed and deformation rate of Arctic sea ice, 1979-2007», *J. Geophys. Res.*, 114, C05013, doi:10.1029/2008JC005066.
- RIGOR, I.G.; J.M. WALLACE, eta R.L. COLONY (2002). «Response of sea ice to the Arctic Oscillation», *J. Climate*, 15, 2648-2663.
- ROTHROCK, D.A.; D.B. PERCIVAL eta M. WENSNAHAN (2008). «The decline in arctic sea-ice thickness: Separating the spatial, annual, and interannual variability in a quarter century of submarine data», *J. Geophys. Res.*, 113, C05003, doi:10.1029/2007JC004252.
- SERREZE, M.C.; A.P. BARRETT, J.C. STROEVE, D.N. KINDIG eta M.M. HOLLAND (2008). «The emergence of surface-based Arctic amplification», *The Cryosphere Discussions*, 2, 601-622.
- SHIMADA, K.; T. KAMOSHIDA, M. ITOH, S. NISHINO, E. CARMACK, F. McLAUGHLIN, S. ZIMMERMANN eta A. PROSHUTINSKY (2006). «Pacific Ocean inflow: Influence on catastrophic reduction of sea ice cover in the Arctic Ocean», *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08605, doi:10.1029/2005GL025624.
- SKOURUP, H. (2010). «A study of Arctic sea ice freeboard heights, gravity anomalies and dynamic topography from ICESat measurements», *Ph. D.*, University of Copenhagen, 145 pp.
- SOLOMON, S. *et al.* (2007). «In Climate Change 2007: the Physical Science Basis». *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, SOLOMON, S.; D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR eta H.L. MILLER (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- STEELE, M. eta T. BOYD (1998). «Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean», *J. Geophys. Res.*, 103, 10,419-10,435.
- STEELE, M.; W. ERMOLD eta J. ZHANG (2008). «Arctic Ocean surface warming trends over the past 100 years», *Geophys. Res. Lett.*, 35, L02614.
- STROEVE, J.; T. MARKUS, W.M. MEIER eta J. MILLER (2006). «Recent changes in the Arctic melt season», *Ann. Glaciol.*, 44, 367-374.
- STROEVE, J.; M. SEREZZE, S. DROBOT, S. GEARHEARD eta M. HOLLAND (2008). «Arctic sea ice extent plummets in 2007», *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, 89, 13-20.
- TRENBERTH, K.E. (2009). «An imperative for climate change planning: tracking Earth's global energy», *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1, 19-27.
- THOMPSON, D.W.J. eta J.M. WALLACE (1998). «The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields», *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1297-1300.
- WANG, M. eta J.E. OVERLAND (2009). «A sea ice free summer Arctic within 30 years?», *Geophys. Res. Lett.*, 36, L07502, doi:10.1029/2009GL037820.

- WARREN, S.G.; I.G. RIGOR, N. UNTERSTEINER, V.F. RADIONOV, N.N. BRYAZGIN, Y.I. ALEKSANDROV eta R. COLONY (1999). «Snow depth on Arctic sea ice», *J. Clim.*, 12(6), 1814-1829.
- ZHANG, J.L.; D.A. ROTHROCK eta M. STEELE (1998). «Warming of the Arctic Ocean by a strengthened Atlantic inflow: Model results», *Geophys. Res. Lett.*, 25, 1745-1748.