

# Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa klima-aldaketaren aurkako tresna interesgarria ote?

*Iñigo Azua*

Immunologia, Mikrobiologia eta Parasitologia Saila.  
Zientzia eta Teknologia Fakultatea (UPV/EHU)

**Laburpena:** Berotegi efektuko gasak, batez ere CO<sub>2</sub>, atmosferan metatzerakoan mundu mailako beroketa gertatzen da. Erregai fosilen erreketatik askaturiko CO<sub>2</sub> erdiak gutxi gorabehera atmosferan irauten du. Baina beste erdia lur-isurbideak eta batez ere ozeanoek xurgatzen dute. Itsasoan CO<sub>2</sub>-ren ziklo biogeokimikoa gertatzen da eta CO<sub>2</sub> bahitu eta itsas hondoraino garraiatzen da edota CO<sub>2</sub> askatzen da (itsas komunitateen arnasketa-prozesuen bidez). Bi prozesu hauen arteko balantze netoa positiboa denez, itsasoa planetako karbonoaren erreserbagai handiena dugu. Karbonoaren garraioa ponpa fisikoak eta biologikoak egiten dute gainazaletik itsas hondoraino. Itsas hondoko CO<sub>2</sub>-ren emendioaren bi heren, fitoplanktonak, zooplanktonak, prokariotoek (bakterioek eta arkeoek) eta birusek osatzen duten ponpa biologikoari dagozkio. Fitoplanktona disolbatutako elikagaiak eta karbono dioxidoz elikatzen da, eta CO<sub>2</sub> materia organiko bihurtzen da fotosintesiaren bidez. Ekoizpen primario hau itsasoko zona fotikoa (lehenengo 100 metroetan) gertatzen da. Zooplanktonak eta prokariotoek bermineralizatzen dute fitoplanktonak askaturiko materia organiko gehiena baina gainontzekoa itsas hondorantz eramaten eta han bahitzen da. Gainazaleko nitrato eta fosfatoen kontzentrazioak oso baxuak dira itsaso gehienetan, eta beraz, ponpa biologikoaren indarra elikagai hauen eskuragarritasunaren menpe dago. Baina, HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll) zonaldeetan fitoplanktonaren hazkuntza ez dago elikagai hauen menpe, kontzentrazio handietan egon arren fitoplanktonaren hazkuntza txikia delako. John Martinek 1988an burdinaren hipotesia plazaratu zuenetik («*Give me a half tank of iron and I will give you an ice age*»), burdinaren bidezko 12 fertilizazio saio egin dira Ozeano Antartikoko, Ozeano Artikoko edo Ozeano Bare ekuatorialeko HNLC zonaldeetan. Eskala txikiko eta epe motzeko saioak izan dira, non burdinaren fertilizazioa egin eta sulfato ferrikoaren kontzentrazio txikiak gehitzen diren. Saio hauek agerian utzi dute HNLC zonaldeetako burdinaren eskasiak mugatu egiten duela fitoplanktonaren hazkuntza. Hori egiaztatuta zenetik, kontuan hartu da itsasoaren ponpa biologikoak atmosferako CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioa erregula dezakeela eta mundu mailako berotzea murrizteko georingeniaritza moduan proposatu da burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa. Baina emaitzak oso aldakorak izan dira eta informazio gehiago behar da CO<sub>2</sub>-ren bahiketan burdinaren gehiketak izan dezakeen eraginkortasuna egiaztatzeko. Izan ere, aldakortasun biologikoak, geografikoak eta ozeanografikoak eragin handia dute. Eskala txikiko saioen bidez ezin da zehaztu zer gertatuko den fertilizazio osteko hamarkadetan edo areago, zer gertatuko den fertilizazio osteko mendean,

Ozeano Antartiko osoa fertilizatzen badugu. Eredu ekologiko gehienek estimatzen dute burdinaren bidezko fertilizazioari esker urtero Gt karbono bat bahi daitekeela atmosferatik, baina oraingo ez da guztiz ezagutzen zein izan daitekeen eragina hainbat kontutan: besteak beste zonalde hauetako eta elikagien azaleratze-lekuetako plankton komunitateen egituran, CO<sub>2</sub> xurgatzeko gaitasunean, klimatologian, zonalde anoxikoen sorreran, biogasaren ekoizpenean edota azidifikazioan.

**Abstract:** The accumulation of the main atmospheric greenhouse gases, especially CO<sub>2</sub>, contributes to the global warming. About half of the CO<sub>2</sub> released from anthropogenic burning of fossil fuels remains in the atmosphere, while the rest is absorbed by terrestrial sinks and especially by the ocean (a third of released). In the sea occurs biogeochemical carbon cycle, sequestering CO<sub>2</sub> by transport to the seafloor, and releasing CO<sub>2</sub> by the respiratory processes of marine communities. The positive net balance between these two processes makes the sea the most important carbon reservoir of the planet. The transport of carbon from the surface to the seabed is highly influenced by physical and biological pump of the sea. Two thirds of the increase in the concentration of CO<sub>2</sub> in the seabed is due to the biological pump formed by phytoplankton, zooplankton, prokaryotes (bacteria and archaea) and virus. Phytoplankton feeds on dissolved nutrients and carbon dioxide by photosynthesis, converting CO<sub>2</sub> into organic matter. This primary production occurs at the photic zone, the first 100 m of the water column. Although zooplankton and prokaryotes remineralize most of the organic matter released by phytoplankton, the rest is transported to the seafloor sequestering it. Because the concentrations of nitrate and phosphate are very low in most of the ocean, the strength of the biological pump is dependent on the concentration of these nutrients. However, in «High Nutrient, Low Chlorophyll» (HNLC) regions of the ocean, phytoplanktonic growth is not limited by the concentration of these nutrients, because there are high concentrations of nutrients but low phytoplanktonic production. Since John Martin, in 1988, suggested iron hypothesis («Give me a half tank of iron and I will give you an ice age»), 12 meso-scale experiments of iron fertilization were carried out in HNLC regions of the Southern Ocean, Arctic Ocean and equatorial Pacific Ocean. These iron fertilization experiments have been made at small-scale and short duration (1 month) by fertilizing a small area of the ocean with low amounts of ferric sulfate. These experiments showed that low concentrations of iron limited phytoplankton growth, taught us a good deal about the initial phytoplankton community response (bloom) to iron enrichment. These results confirmed iron limitation of productivity in HNLC regions around the globe. From the evidence of this, and considering that the biological pump can regulate the concentration of atmospheric CO<sub>2</sub>, it has been suggested the possible use of ocean iron fertilization as a geoengineering tool to mitigate global warming. However, the results are highly variable and inconclusive with regard to carbon sequestration and, because of this, more information is needed to confirm the efficiency of the addition of iron in atmospheric CO<sub>2</sub> sequestration. The physical oceanographic, geographic and biological variability influence the long-term fate of blooms induced by iron enrichment constraining generalizations about iron-induced carbon sequestration. Experiments at small-scale can nor resolve important questions about geoengineering scenarios for carbon sequestration on the order of decades to centuries, and on scale of great areas as all Southern Ocean. Although most ecological models estimate the ocean sequesters 1 Gt C per year by iron fertilization, still do not know the exact effects of this fertilization on the plankton community structure, absorption capacity of CO<sub>2</sub>, climate, formation of anoxic zones, biogas production or acidification of these areas and/or the nutrients' upwelling areas.

## KLIMA-ALDAKETA

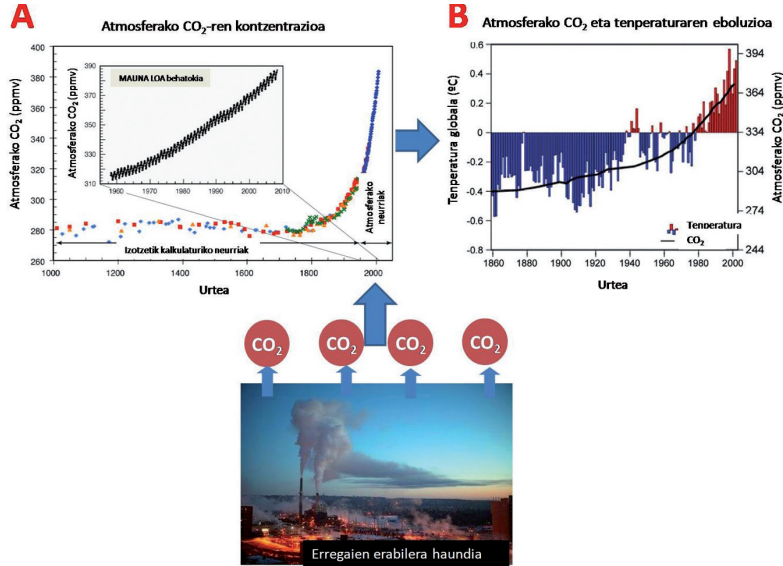
Berotegi efektuko gasak, batez ere CO<sub>2</sub>, atmosferan metatzen dira. Eguzkitik datorren uhin-luzera laburreko energiak berotu egiten du lurra-  
ren gainazala. Lurraren gainazalak igortzen duen uhin-luzera luzeko energia (infragorria) eguratsak xurgatzen du eta zati bat Lurrera berriro bidalita, gainazala berotzen du (1. irudia). Zientzialari gehienek ustez, industri iraultzan atmosferan gertaturiko CO<sub>2</sub>-ren metaketa izan da mundu mailako berotzearen eragile nagusia (2. irudia). Planetan karbonoaren ziklo naturala gertatzen da eta batez ere bizidun fotosintetizatzaile autotrofoek CO<sub>2</sub> karbono-iturri gisa erabiltzen dute biomasa berria sortzeko. Autotrofoek sorturiko konposatu organikoek baliatuz heterotrofoak hazten dira eta CO<sub>2</sub> askatzen dute (3. irudia). Duela gutxi arte, prozesu hauek ondo orekatuta zeuden atmosferako CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioa egonkor mantenduz. Azken bi hamarkadetan erregai fosilen erabilera masiboak CO<sub>2</sub>-igorpenaren % 49ko igoera eragin du mundu mailan. 2009an batez ere mundu mailako finantza-krisiaren ondorioz igorpenak % 1,4a jaitsi ondoren, 2010ean berriro % 5,9aren gorakada gertatu da 10.000 tonako igorpena-marka ezarriz (1). Igorpen hau dela-eta, berotegi efektuko gas honen kontzentrazioa atmosferan 389,6 ppm-raino heldu da (industri iraultza hasi baino lehen zegoen kontzentrazioa 280 ppm zelarik). Herri garatuetan gertatu diren beherakadak orekatu egin dira beraien aberastasuna handitzeko nahian eta garapen bidean karbono eta petrolio gehiago erabiltzen dituzten zonaldeetan gertaturiko gorakadekin. Horrela, CO<sub>2</sub>-ren igorpenaren % 54a dagokie egun garapen bidean dauden herri hauei.



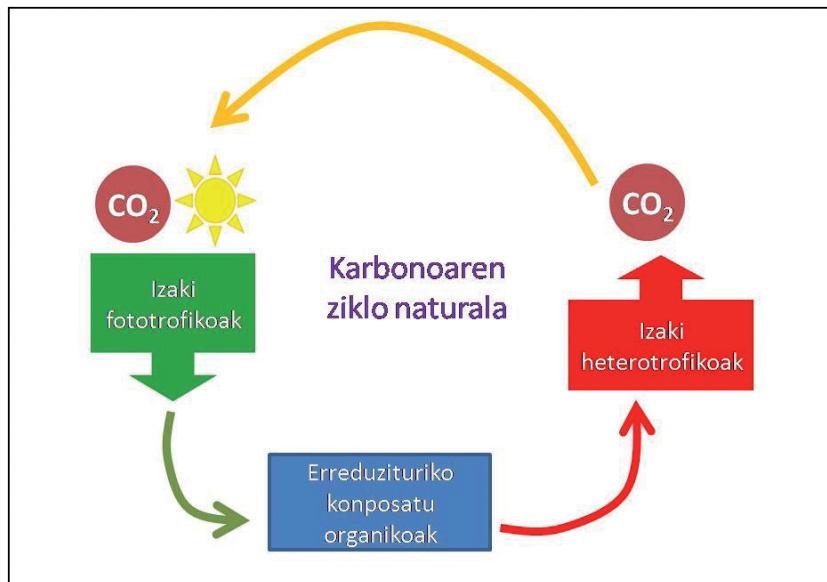
Iturria: UNEP -Grid-Arendal.

### 1. irudia. Berotegi efektua.

EKAIA, ale berezia (2012)



**2. irudia.** Klima-aldaketa. A. Manu Loa behatokia atmosferako CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioaren bilakaera azken 1.000 urteetan (izotzetik kalkulaturiko balioak + atmosferako neurriak). B. Atmosferako CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioaren eta mundu mailako temperaturaren bilakaera azken 150 urteetan. CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioak (ppmv = µg/ml).



**3. irudia.** Karbonoaren erabilera biologikoa.



*Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa  
klima-aldaketaren aurkako tresna interesgarria ote?*

---

2000tik aurrera gertatu diren mundu mailako igorpenak Klima Aldaketari buruzko Nazioarteko Batzordeak (ingelesez IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change), hau da klimaren bilakaeraz arduratzen den erakunde garrantzitsuenak izandako susmotik mutur gorenean kokatzen dira. Erakunde honen arabera 2100ean beroketa 2°C-koa baino pixka bat handiagoa gertatuko zen, nahiz eta igorpena murriztea lortu ahal izan. Zoritxarrez, 2010ean ikusi den goranzko joera kontuan hartuta, 4°C-ko gorakadaraino hel daiteke mende honetan berotzea. Gainera, ikasketa zientifiko batzuen arabera ozeano sakonak (gainazaletik 200 m-tik beherakoak) mundu mailako aldaketa maskaratu egiten du, nahiko bero xurgatzen duelako. Horrela gertatuko ez balitz, askoz gehiago nabarituko lirateke planetako atmosferan eta lurrean tenperaturaren gorakadak eta izotzen fusioa. Itsasoan buien bidez neurturiko tenperaturek berotzea adierazten duten arren, gertatzen ari den gorakada ez da pentsa litekeen bezainbestekoa. Berotze hau ez zaio balantzeari egokitzen itsas hondoak planetako bero gehigarriaren biltegi moduan jokatzen duelako. Atmosferaren, urperatutako lurren, itsas izotzaren eta ozeanoaren arteko harremanen azterketan oinarrituta egiten dira eredu informatikoak. Eredu hauen arabera (2), tenperaturek gradu zentigrado batzuk gora egingo dute mende honetan, baina hala ere, berotze joeran zehar goranzko uneez gain, beste une batzuetan tenperatura egonkor egongo da. Une hauetan itsasoan bero gehigarria sartuko da eta itsasoko geruza sakonek oso bero kantitate handiak (normala baino % 18 edo % 19 handiagoak) xurgatuko dituzte itsasoko uren zirkulazioan gertatuko diren aldaketei esker.

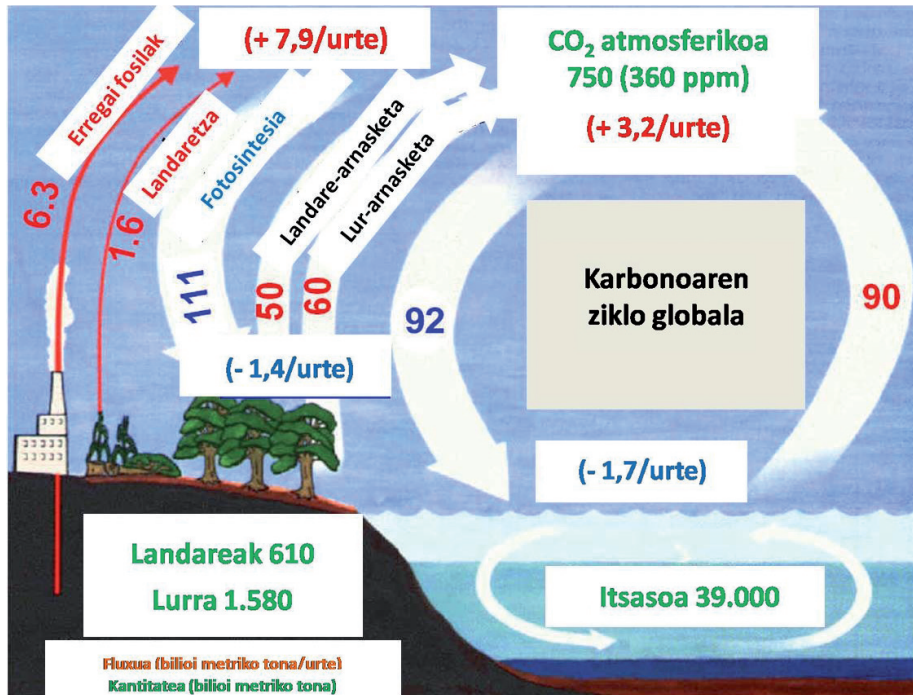
Gobernuek hainbat klima-batzarretan konpromisoa hartu dute tenperatura 2°C-tik behera mantentzeko. Honetarako neurriak hartu behar dira klima-aldaketaren alde larriak ekiditeko. Alde hauen artean azpimarratze-koak dira zonalde handietan uraren eskasia, itsasoaren mailaren handipena, muturreko gertakari atmosferikoen gorakada, bioanizkoiztasunaren galera larria edo CO<sub>2</sub>-ren isurbide moduan jokatzekeo itsasoak duen gaitasunaren beherakada. Horrela, 1997an Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) delako erakundeak klima-aldaketari buruzko Kiotoko protokoloa onartu zuen. Protokolo honen bidez lortu nahi da berotegi efektuko 6 gasen (karbono dioxidoa (CO<sub>2</sub>), metanoa (CH<sub>4</sub>), oxido nitrosoa (N<sub>2</sub>O), hidrofluorokarbonoak (HFC), perfluorokarbonoak (PFC) eta Sufre hexafluoruroa (SF<sub>6</sub>)) igorpenak murriztea (gutxienez 1990ean zegoenaren % 5a) 2008tik 2012ra. Honetaz gain bultzatu egin du energia ezkonbentzional berriztagarriak erabiltzeko eta mundu mailako aldaketa txikitzeko garapen sostengarriaren sorkuntza. Nahiz eta protokoloa 1997an onartu, 2005era arte ez da abian jarri.

2007an 13. klima-batzarra egin zen Balin eta 2012tik aurrera ezartzeko Baliko ibilbide-orria izeneko 2 urteko prozesuaren akordio batera heldu ziren. Ibilbide-orri honen barruan Baliko ekintza-plangintzak 4 osagai gako

identifikatzen zituen: arintzea, moldaera, finantzak eta teknologia. Copenhaguen 2009an klima-aldaketari buruzko 15. batzarrean herriek adostu zuten konpromisoa berotzea bi gradu zentigradoan mugatzeko. Urte bat beranduago, Cancunen 16. batzarrean bildu ziren 190 herriek akordio bat onartu zuten Kiotoko protokoloa luzatzeko eta murrizketa igotzeko. 2011ko abenduan Durbanen (Hego Afrikan) egindako azken batzarrean akordio bat onartu zuten 2015ean «protokoloa, tresna legal edo indar legalarekin akordioa» bateratzeko. Honek herri guztien igorpena 2020tik aurrera mugatuko luke. Baikorren ustez lorpen izugarria da akordio honen zerrendan berotegi efektuko gasen igorpenen % 85a askatzen duten herriak (EEUU, Txina, India eta Brasil) sartuta egotea.

### ITSASOIA, ATMOSFERAKO CO<sub>2</sub>-REN ISURBIDEA

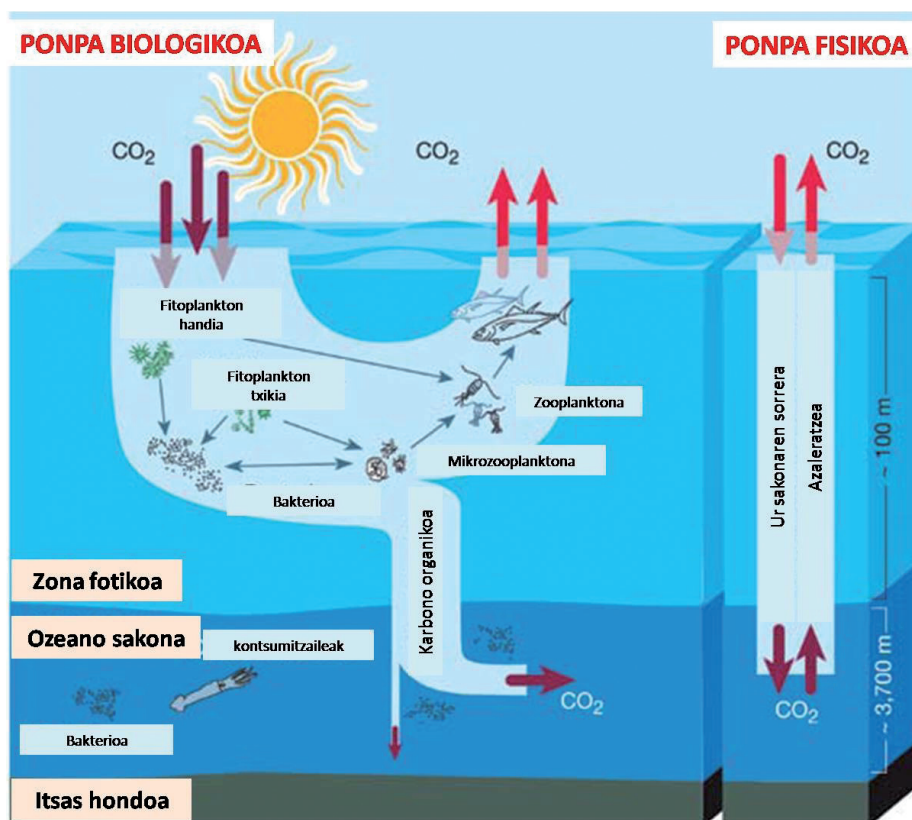
Askaturiko CO<sub>2</sub> erdiak gutxi gorabehera atmosferan irauten du. Beste erdia, ordea, lur-isurbideek eta batez ere ozeanoek xurgatzen dute (4. irudia). Itsasoan karbonoaren egoera organiko eta ezorganikoen arteko ziklo biogeokimikoa gertatzen da. Horrela, CO<sub>2</sub> itsas hondoraino garraiatzen da,



**4. irudia.** Planeta mailako karbonoaren zikloa. Erreserborio desberdinetan dauden kantitateak (bilioi metriko tona C) eta fluxuak (bilioi metriko tona C/urte).

*Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa  
klima-aldaketaren aurkako tresna interesgarria ote?*

eta CO<sub>2</sub> askatzen da itsas komunitateen arnasketa prozesuen bidez. Prozesu hauen arteko balantze netoa positiboa da eta urtero atmosferatik 1,7 bilioi metriko tona ezabatzen dira, hots erregai fosilen erreketagatik askatzen denaren herena. Beraz, itsasoa da planetako karbonoaren erreserbagai handiena. Karbonoaren garraioa gainazaletik itsas hondoraino ponpa fisikoak edo solugarritasunarenak eta ponpa biologikoak eragiten dute (5. irudia). Bi ponpa hauek itsas hondoko CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioa emendatzen dute.



5. irudia. Itsasoaren ponpa fisikoa eta biologikoa.

### Ponpa fisikoa

Haize eta uraren arteko interfasean gertaturiko gasen elkartrukeak eta itsas hondorantz CO<sub>2</sub> garraiatzen duten prozesu fisikoek ponpa fisikoa (5. irudiaren eskuinaldean) osatzen dute. Karbono dioxidoa atmosferatik itsasora gas-elkartrukearen bidez sartzen da. Elkartruke hau haizearen abiaduraren eta CO<sub>2</sub>-ren presio partzialaren arabera aldatzen da. Erregai fosilen

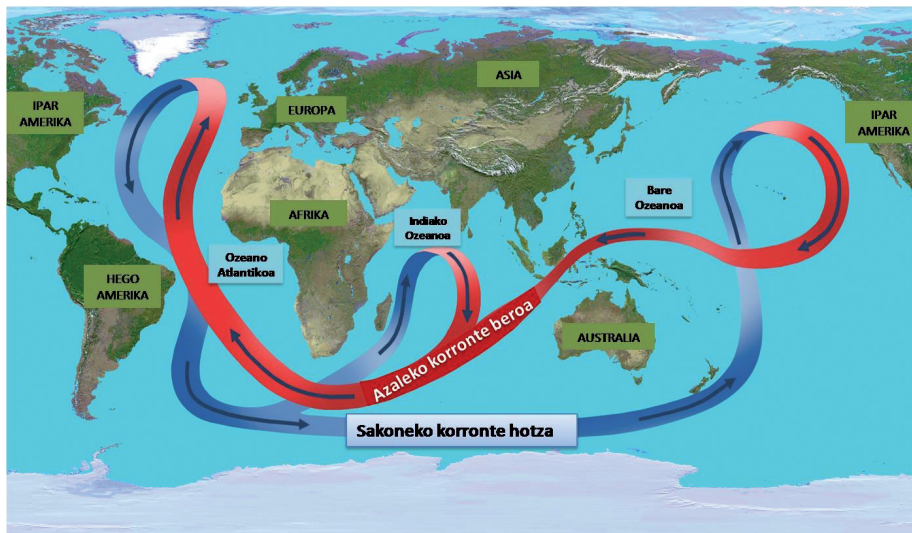
erreketa masiboagatik askaturiko atmosferako CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioa handituta kantitate gehiago sartuko da ozeanoan.

Baina tenperaturak eragin negatibo zuzena edota zeharkakoa dauka CO<sub>2</sub>-ren xurgapenean eta beraz, klima-aldaketagatik ozeanoan gertatu den tenperaturaren handipenak karbono dioxidoaren xurgapenaren beherakada nagusia ekarriko du. Tenperaturak zuzen kontrolatuko du itsasoko ur gaziak xurgaturiko karbono dioxidoaren kantitatea, tenperatura handitzen den heinean gasen solugarritasuna jaisten delako. Beraz, gainazaleko ur hotsek CO<sub>2</sub> gehiago xurgatzen dute ur beroek baino. Mundu mailako aldaketaren ondorioz itsasoko ura berotu eta itsasoan disolba daitekeen CO<sub>2</sub>-ren kantitatea jaitsiko da.

Uraren dentsitateak ere eragiten dio itsasoak xurgaturiko anhidrido karbonikoaren kantitateari, hots, itsasoan sartzen den ur gezaren kantitatearen menpe dago xurgapena. Ur geza itsasoan sartzen den heinean, itsasoko uraren dentsitatea jaitsi egiten da eta CO<sub>2</sub>-ren solugarritasuna txikitu egiten da. Mundu mailako aldaketari esker tenperatura handitzen den neurrian polotan itsasora ur gezaren kantitate handiagoa heltzen da, orokorrean itsas hondorako garraiatzen den CO<sub>2</sub>-ren kantitatea jaitsiz.

Gainera, tenperaturak beste era batez ere eragiten dio uretako dentsitateari. Itsasoaren zabalera handietako ur hotz eta dentsoek itsasoaren zabalera txikietako dentsitate txikiagoetako ur beroak baino pisu gehiago dute eta urperatu eta itsas hondorantz CO<sub>2</sub> garraiatzen dute. Itsasoaren zabalera handietan gertatzen den uraren urperaketa beste zonaldeetako azalera prozesuekin (ingelesez *upwelling* izenekoekin) orekatzen da. Azalera den ura gainazalera heldutakoan, berotzen joaten denez CO<sub>2</sub>-ren solugarritasuna jaitsi egiten da eta hori dela-eta, atmosferara askatzen da berriro. Prozesu honi desgasifikazioa deritzo. Planeta mailan ur-masa hauen mugimenduari itsasoaren konbekzio-gerrikoa deitzen zaio (6. irudia). Ipar Ozeano Atlantikoraino heltzen diren gainazaleko ur gazi eta beroak neguan hoztu ondoren hondoratzen dira ur sakonaren sorkuntza deituriko prozesuan. Ur sakonaren masa hauek hegoalderantz mugitzen hasi eta Ozeano Antartikoan sorturiko ur berri hotzarekin elkartzen dira. Ur hotzak nahitaezko elikagaiez (N, P, Si) eta karbono dioxidoz aberasten dira uretan eta sedimentuetan gertaturiko materia organikoaren dekonposaketagatik. Ur-masa honek Ozeano Antartikotik mugitzen jarraitzen du eta bi zonaldeetan azalera den dira, Indiako Ozeanoan eta Ipar Bare Ozeanoan, «upwelling» delako prozesuei esker. Gero, ur-masa honek Ipar Ozeano Atlantikoraino egiten du berriz eta zikloa edo gerrikoa osatzen du. Itsasoko uraren zirkulazioa oso sentikorra da sisteman sartzen den ur gezarekiko. Ura gezegia bada, hozteak ez du itsas hondoraino urperatzeko bezainbeste dentso bihurtuko. Beraz, ura ez bada hondoratzen itsasoaren zabalera handietan haizea izango da golkoko korrontearen mugimenduaren eragile bakarra, eta kirkulazio orokorra balaztatzen du. Ipar Ozeano Atlantikoan azken 40 urteetan

*Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa  
klima-aldaketaren aurkako tresna interesgarria ote?*



**6. irudia.** Itsasoaren konbenzio-gerrikoa.

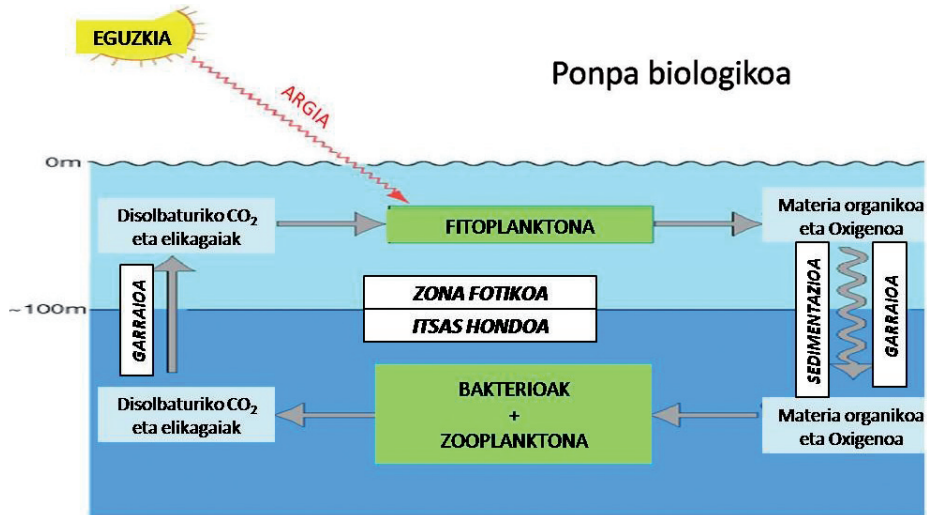
gazitasuna indarrez txikitu da mundu mailako aldaketaren ondorioz ur gezaren sarrera handiagogatik. Klima-aldaketak edo planetako tenperaturaren gorakadak atmosferatik itsas hondorainoko CO<sub>2</sub>-ren garraioa txikituko du uretan gasen solugarritasuna eta uren dentsitateak jaisterakoan.

**Ponpa biologikoa**

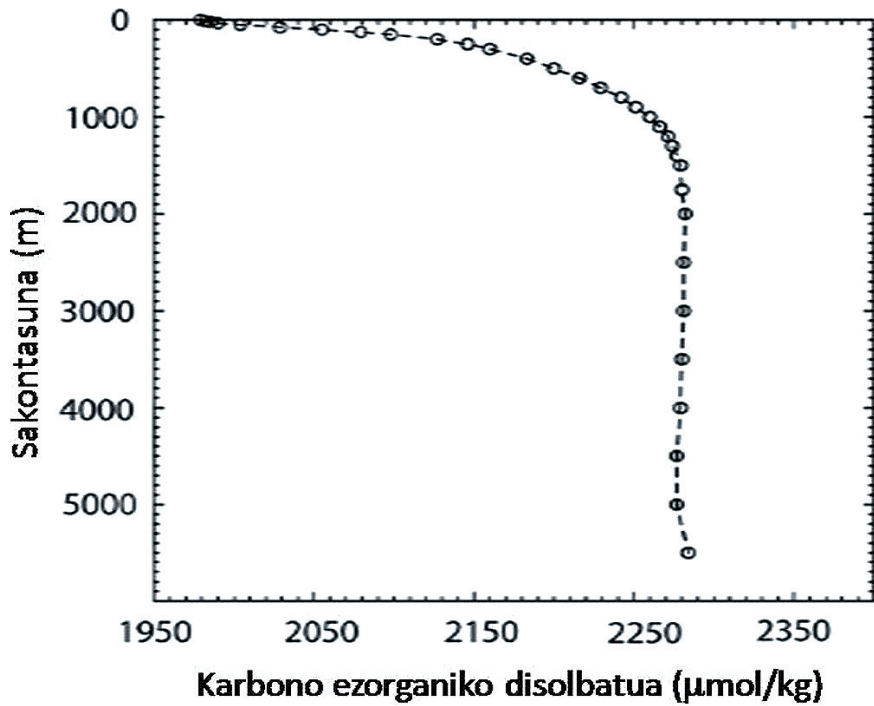
CO<sub>2</sub>-ren isurbide moduan jokatzen duenean, itsasoaren ponpa biologikoa da eragile nagusia (5. irudiaren ezker aldean). Karbono gehienaren hondoranzko garraioa ponpa biologikoa osatzen duten komunitate bizidunek betetzen dute. Karbonoaren itsas zikloan ponpa biologikoak duen garrantzia ondo ezagutzeko, beharrezkoa da bere osagaiak edo komunitateak (fitoplanktona, zooplanktona, prokariotoak eta birusak), haien tamaina erlatiboak, komunitate hauen tamaina kontrolatzen duten mekanismoak eta aldakortasuna leku-denborala aztertzea eta ulertzea.

Fitoplanktona disolbaturiko elikagaiez (batez ere nitrogenoz eta fosfatoz) eta karbono dioxidoz elikatzen da eta materia organiko bihurtzen du fotosintesiaren bidez. Prozesu hau, hots, ekoizpen primarioa, ur zutabearen lehenengo 100 metroetan gertatzen da (7. irudia). Materia organiko gehiena disolbaturikoan eraldatu egiten da (gutxi gorabehera % 80a arte) fitoplanktonak aktiboki kanporatzen dituen molekula gisa, edo hiltzerakoan sortzen diren hondar gisa. Gainontzekoa (% 20a) itsas hondorantz eramaten da. Urperatzen denaren % 80a partikulei dagokie eta gainontzekoa disolbaturiko





7. irudia. Itsasoaren ponpa biologikoa.



8. irudia. Itsasoan disolbaturiko karbono ezorganikoaren kontzentrazioaren eta sakontasunaren arteko erlazioa.



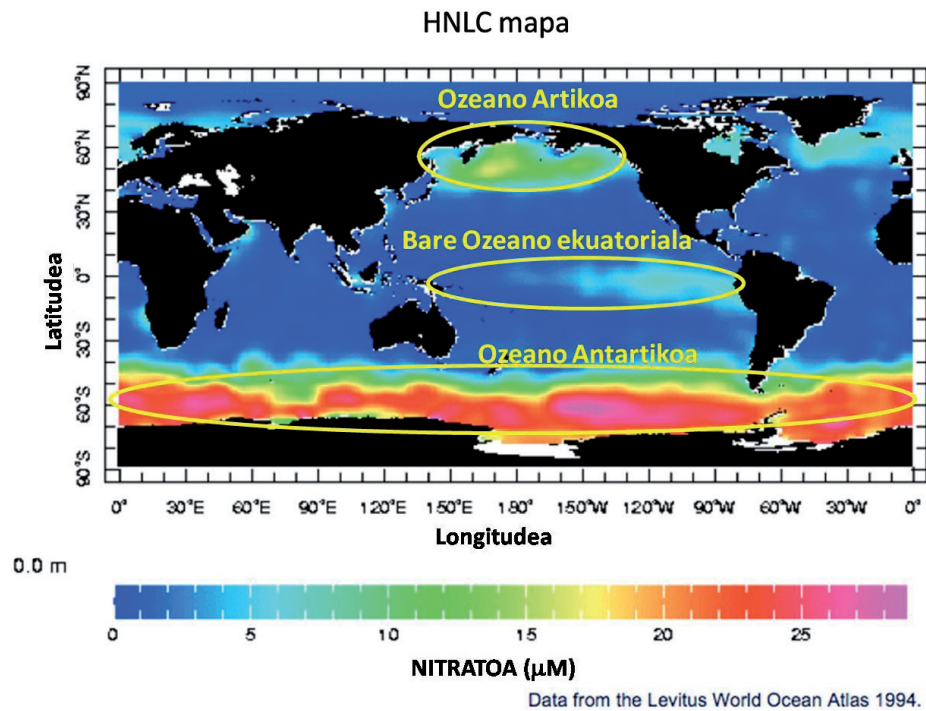
karbono organikoa da, itsasoaren zirkulazioari esker garraiatzen dena. Ur zutabearen lehenengo 1.000 metroetan, termoklinan, prokarioto diren bakterioek eta arkeoek, eta zooplanktonak elikagai eta CO<sub>2</sub>-ra bihurtzen dute berriz materia organikoa mineralizazioaren bidez. Berez, materia organiko disolbatua gainazaleraino garraiatzen dute eta bertan fitoplanktonak berriz erabiltzen du. Nahiz eta mineralizazioa termoklinan gertatu, elikagai batzuk hondorantz joaten dira eta ponpa fisikoaren bidez birsuspendituko ez balira, ekoizpena bukatu egingo litzateke. Ponpa biologikoa gainazaleko nitrato eta fosfatoen ezabapenean eraginkorki ibiltzen da. Horrela, itsaso gehienetan gainazaleko nitrato eta fosfatoen kantitateak oso txikiak dira, planktonen hazkuntzarako elikagai mugakor gertatzen direlarik.

Itsasoan atmosferatik xurgaturiko CO<sub>2</sub> nora joaten den finkatzeko, ur zutabeko (DKI) karbono ezorganiko disolbatuaren kontzentrazioa analizatu da (8. irudia). Datuek adierazten dute ur zutabearen zehar hondoratzen den heinean, DKI, eta berez CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioa handitzen dela (gutxi gorabehera gainazaleko 1.950 μmol/Kg-tik 5.000m-ko 2.250 μmol/Kg-ra). Sakontasunean CO<sub>2</sub>-ren emendio honen bi heren ponpa biologikoari dagozkio, gainontzekoaren arduraduna ponpa fisikoa izanda.

## **BURDINAREN HIPOTESIA**

Ereduek isladatzen dute ponpa biologikoa amatatzekotan gainazaletik itsas sakonerantz jorratzen den CO<sub>2</sub> asko ez litzatekeela jorratuko eta atmosferako CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioa 200 ppm handituko litzateke. Bestealde, gainazaleko elikagai guztiak ezabatzeko ponpa biologikoaren eraginkortasuna hobetuko bagenu, itsas hondorantz CO<sub>2</sub>-ren fluxua 100 ppm handituko litzateke. Beraz, ponpa biologikoak erregula dezake atmosferako CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioa 300 ppm-ko tartean. Kantitate hau garrantzitsua dela ulertuko dugu, kontuan hartzen bada atmosferako gaurko kontzentrazioa 389 ppm dela.

Planetaren gehiengoan itsasoaren ponpa biologikoak etekin handia du gainazaletik elikagaiak ezabatuz. Itsas zonalde hauetan bizidun fotosintetizatzaileentzat beharrezkoak diren nitrato, fosfato eta silikato bezalako elikagaien eskuragarritasunaren menpe dago ponpa biologikoaren indarra. Baina, badaude zonalde itsastar berezi batzuk, honelako baldintza betetzen ez dutenak: Ozeano Antartikoa, Bare Ozeano ekuatoriala eta Ozeano Artikoa, non klorofilen kontzentrazioak baxuak diren, elikagai hauen kontzentrazioak handiak badira ere (9. irudia). Zonalde hauei itsasoaren % 30a dagokie eta HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll) delako zonalde dute izena. Hemen, esan bezala, fitoplanktonaren hazkuntza ez dago nitrogeno, fosfato edo silikatoen kontzentrazioen menpe.



**9. irudia.** HNLC (High Nutrient Low Chlorophyll) zonaldeetako mapa. Nitratoen kontzentrazioa itsasoaren gainazalean.

## John Martin



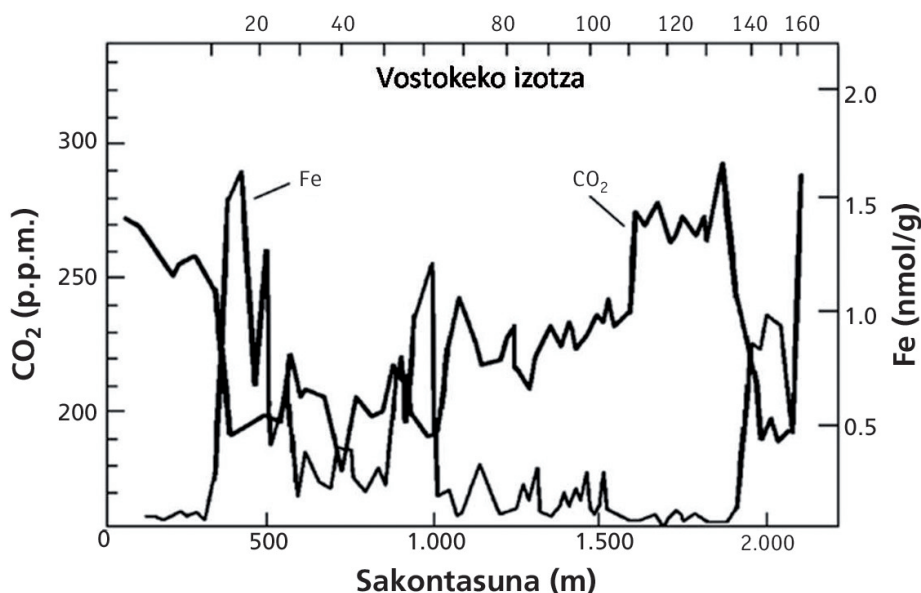
**"Give me a half tank of iron  
and I will give you an ice age"**

**10. irudia.** John Martin eta bere burdina-hipotesia.

*Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa  
klima-aldaketaren aurkako tresna interesgarria ote?*

Gertaera hau 80.eko hamarkadatik sakonki aztertzen ari da eta agerian gelditu da burdinaren mugapena, argiaren kantitatea edota harraparitzak eragindako kontrola izan daitezkeela hazkuntzaren eragileak. 1920tik sumatzen zen zonalde hauetan burdinaren mugapenak betetzen zuela ekoizpen primarioaren kontrola (3), baina 1988 arte John Martinek ez zuen «**burdinaren hipotesia**» plazaratu (4). Hipotesi honek «*Give me a half tank of iron and I will give you an ice age*» garrantzia izugarria izan dezake klima-aldaketaren aurkako borrokan (10. irudia).

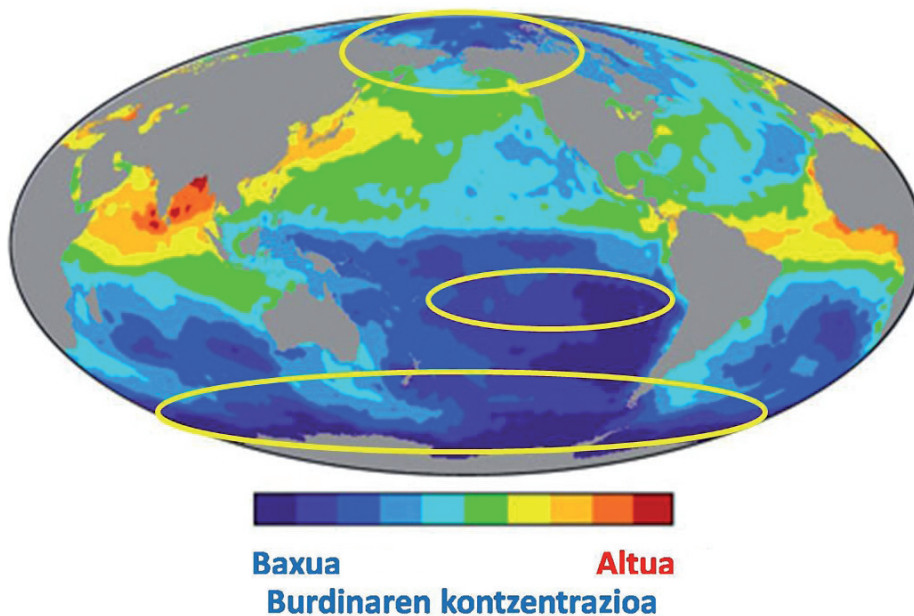
Antartidako izotzaren nukleoen erregistro fosilak agerian utzi du burdinak ere mugapena ezartzen duela (5). Izotzaren azterketak egiaztatzen du hautsen kontzentrazio handietako epealdietan itsasoko burdinaren kontzentrazio handiak eta atmosferako CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazio txikiak egon direla historian zehar (11. irudia). Beraz, erlazio negatiboa ikusten da burdinaren eta CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioen artean. Zergatik? Agian burdinak nitrogenoaren finkapena eta elikagaien erabilera areagotu egin dituelako. Antartidako Vostokeko estazio sobietarreko izotzaren gas-burbuilek (azken 420.000 urteetan atmosferako konposaketaren historia argitzen dutenek) adierazten dute glaziaraldietan fitoplanktonaren ugartasuna handiagoa zela egungo glaziazio arteko aldikoa baino. Nola izan daiteke hau? Berez, glaziaraldiko kliman landaretza murrizten da. Murrizketa honen ondorioz, lurrean haizeek eragindako erosioa handi daiteke eta lurretik itsasorainoko burdina-garraioa bultzatzen da.



**11. irudia.** Antartidako izotzaren erregistro fosilak: Fe eta CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioak Vostokeko izotzean.

Burdina bizidun guztiontzako mikroelikagai beharrezkoa da erreazio entzimatico askorekin harremanetan dagoelako. Burdinak elektroigarraio kateetako elektroien proteina garraiatzaileen kofaktore moduan jokatzen du, hazkuntzarako beharrezkoa izanda. Bizidun prokariotiko batzuek egiten duten  $N_2$ -ren finkapenerako beharrezkoa den nitrogenasa entzimarekin ere harremanetan dago. Beraz, burdinaren mugapenak nitrogenoaren urritasuna ere ekar lezake.

Itsasoko burdinaren iturri nagusia burdina daraman haizea da. Burdina, kontinenteetako zonalde idorretatik eta erdiidorretatik datozen lurrezko burdinez aberasturiko are-bikorrak daramatzan haizeak sartzen du itsasoan, garraio eolikoaren bidez. Itsasoko burdinaren batez besteko kontzentrazioa oso txikia da ( $<1nM$ ) eta HNLC zonaldeetan itsasoko gainontzekoarena baino askoz txikiagoa da (12. irudia).



**12. irudia.** Burdinaren banaketa ozeanoetan.

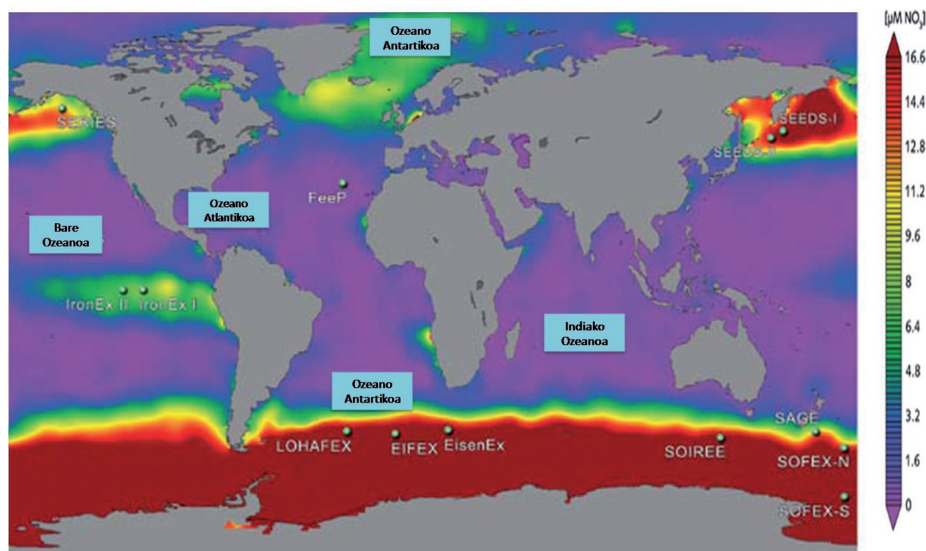
## BURDINAREN BIDEZKO ITSASOAREN FERTILIZAZIOA

### IronEx I fertilizazio saioa. Burdinaren mugakortasunaren teoria

Azken 20 urte hauetan, sumatu izan da HNLC zonaldeetan burdinak ekoizpen primarioa mugatzen duela eta horrela itsas hondoranzko karbo-

*Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa  
klima-aldaketaren aurkako tresna interesgarria ote?*

no-garraioa erregulatzen duela ponpa biologikoaren bidez. Hala ere, zaila izan da hau guztia egiaztatzea. Honetarako, lehen, kutsadurarik gabeko itsasoko burdinaren kontzentrazioak neurtu ziren (6). Gero, laborategian, Alaskako Golkoko eta Ozeano Antartikoko ur-laginekiko botila batzuei burdina gehitu ondoren, bere eragina bizidun fotosintetizatzaileen hazkuntzan, eta CO<sub>2</sub>-ren xurgapenean egiaztatu zen (7). Baina, harremana ikusi ondoren, nola eraman ideia hau laborategitik itsasora? 1993an John Martin eta bere laguntzaileak izan ziren burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazio saioa lehendabizi *in situ* egin zutenak (IronEx I: Iron Experiments I) (8) (13. irudia). Ikerlari hauek, Ozeano Bare ekuatorialeko HNLC zonaldean, burdina eta itsasoko korrontegatik gertatutako burdinaren mugimendua-  
ren marraldia gehitu zuten eta ikusi zuten egun batzuk igaro ondoren, fitoplanktonaren hazkuntza masiboa (*bloom*) gertatzen zela. Beraz, fitoplanktonaren hazkuntza burdinak mugatzen zuela egiaztatu zuten. Honetan oinarrituta, haiek «**burdinaren mugakortasunaren teoria**» kaleratu zuten. Teoria honen arabera, burdinaren gehiketak fitoplanktonaren hazkuntza azeleratuko luke HNLC zonaldeetan, eta handitu egingo luke atmosferatik xurgatzen den CO<sub>2</sub>-ren kantitatea. Atmosferatik itsasorantz aldatzen den CO<sub>2</sub>-ren kantitatea handitzerakoan fitoplanktonaren hazkuntza masiboak (*bloom*-ak) gertatuko lirateke. Hauek, sedimentazioaren bidez, itsas hondoraino garraituko eta itsas hondoan karbono gehiago biltegitratuko litzateke.



**13. irudia.** Burdinaren bidezko fertilizazio saioen izenak eta kokapenak, eta nitratoen kontzentrazioak ozeanoetan.



### **Burdinaren bidezko fertilizazio saioak 1995tik 2004 arte**

Ikerketa hori egin zenetik 2004 arte, burdinaren bidezko beste 10 fertilizazio saio (9-22) egin dira, bai Ozeano Artikoan, bai Ozeano Antartikoan, bai Ozeano Bare ekuatorialen (13. irudia). Eskala txikiko (zonalde txikiko) eta epe motzeko (gutxi gorabehera hilabete bateko) saioak izan dira, eta burdinaren bidezko fertilizazioa egin da sulfato ferrikoaren kontzentrazio txikiak (450-2.350 kg) gehituz itsasoko gainazalari (1. taula). 2. taulan agertzen dira burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazio saio desberdin hauetan frogatu nahi ziren hipotesiak eta saio hauetatik atera diren ondorio garrantzitsuenak.

1995ean IronEx II (Iron Experiments II) fertilizazio saioan, lehengo saioan ikusi zen moduan, burdina berriro fitoplanktonaren hazkuntzaren mugatzailea zen, IronEx I saioan baino fitoplankton-hazkuntza handiago gertatu zelarik (9). 1999an SOIREE (Southern Ocean Iron Release Experiments) (10) eta 2000an, EisenEx (European Iron Enrichment Experiments) (11, 12) fertilizazio saioetan, egiaztatu zen beste HNLC zonalde batean, hain zuzen Ozeano Antartikoan, burdinak ere mugatzen zuela fitoplanktonaren hazkuntza, burdinaren bidez fertilizatu ondoren hazkuntza masiboa atzeman zelako. SOIREE saioan, burdinaren bidez fertilizatu eta fitoplanktonaren hazkuntza masiboa gertatu ondoren, ez zen itsas hondoranzko CO<sub>2</sub>-ren garraio handiagorik ikusi. Urte bat beranduago, 2001ean, SEEDS I (Subarctic Pacific Iron Experiment for Ecosystems Dynamics Study I) fertilizazio saioan egiaztatu zen, Ozeano Bare azpiartikoan ere, fitoplanktonaren hazkuntza burdinak mugatzen zuela (13). Orain arte aipaturiko saioetan, hiru HNLC zonalde desberdinetan egin zirelarik, burdina gehitzerakoan nitratoaren kontzentrazioak jaisti egin ziren (1. taula). Seguraski, burdinaren mugapena desagertzerakoan, fitoplanktonaren hazkuntza masiboa gertatu zen, fitoplanktonak itsasoko gainazaletik nitratoa ezabatu zuelarik.

SEEDS I fertilizazio saioan ikusi zen fitoplankton komunitatearen egituraren aldaketa garrantzitsuak ere sortzen zirela. Aldaketa hauen artean azpimarratzekoa da batez ere diatomeoak hazi zirela, beraien garrantzia erlatibo handituta. Silikatoaren mugapenik ez egonda, fitoplankton-zelula txikiak tamainaz handitzen dira. Diatomeo handi hauen hazkuntza masiboa gertatu ondoren beraien tamaina handiengatik sedimentatu egiten dira eta karbono gehiago eramaten dute itsas hondorantz. Gainera, diatomeoek agregatuak sortzen dituzten partikula exopolimeriko gardenak eta material muzilaginosoa ekoizten dituzte. Agregatu hauek sortzerakoan beraien sedimentazioa areagotzen da.

Burdinaren gehiketak fitoplanktonaren hazkuntza handitzen zuela egiaztatu ondoren, hurrengo galdera zen ea fitoplankton-hazkuntzaren gorakadak atmosferako karbonoaren xurgapenaren gorakada ekarriko



*Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa  
klima-aldaketaren aurkako tresna interesgarria ote?*

**1. taula.** Burdinaren bidezko fertilizazio saioen laburpena 1993tik 2004 arte.

	IronEX I	IronEx II	SOIREE	EisenEX	SEEDS I	SOFeX-S	SOFeX-N	SERIES	EIFEX	SEEDS II	SAGE	FeeP
Urtea	1993	1995	1999	2000	2001	2002	2002	2002	2004	2004	2004	2004
Urtaro	Udazkena	Uda	Uda	Udaberria	Uda	Uda	Uda	Uda	Uda	Uda	Udazkena	Udaberria
Aipamena	(8)	(9)	(10)	(11), (12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17), (18)	(19)	(20)	(21), (22)
Area (km <sup>2</sup> )	64	72	50	38,5	80	225	225	77	150	64	100	25
Fe (kg)	450	450	1.740	2.350	350	1.260	1.712	490	2.820	491	1.100	1.840
Temp (°C)	23	25	2	3-4	11	-1	5	13	4-5	9-12	12	21
Iraup (egun)	10	17	13	21	13	30	30	25	35	26	15	21
NO <sub>3</sub> (mmol/m <sup>3</sup> )	Ezer ez	5	3	<2	>15	2		>5				
Cl <sub>0</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	0,2	0,2	0,2	0,5	0,9	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	0,6	0,04
Cl <sub>max</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	0,6	3,3	2,3	2,8	23,0	2,5	2,4	5,5	3,0	2,4	1,3	0,07
Fito nag	Nahasketa	Diatomea	Diatomea	Diatomea	Diatomea	Diatomea	Nahasketa	Diatomea	Diatomea	Nahasketa	Nahasketa	<i>Prochloro</i>
E.P.H.	4	6	9	4	4	6	10	10	2	2	2	2

**Fe:** Burdinaren gehiketa; **Iraup:** Iraupena; **NO<sub>3</sub>:** Nitraoeten urripena; **Cl<sub>0</sub>:** Klorofilaren kontzentrazioa burdina gehitu baino lehen; **Cl<sub>max</sub>:** Klorofilaren kontzentrazio maximoa burdina bota ondoren; **Fito nag:** Fitoplankton nagusia; *Prochloro:* *Prochlorococcus*; **E.P.H.:** Ekoizpen Primarioaren Handipena (max/min erratioa).

**IronEx:** Iron Experiments.

**SOIREE:** Southern Ocean Iron Release Experiments.

**EisenEX:** European Iron Enrichment Experiments.

**SEEDS:** Subarctic Pacific Iron Experiment for Ecosystems Dynamics Study.

**SOFeX:** Southern Ocean Iron Experiment.

**SERIES:** Subarctic Ecosystem Response to Iron Enrichment Study.

**EIFEX:** European Iron Fertilization Experiment.

**SAGE:** Surface-Ocean Lower-Atmosphere Studies Air-Sea Gas Exchange.

**FeeP:** Iron-enrichment experiment.

**2. taula.** Burdinaren bidezko fertilizazio saioen hipotesiak eta ateratako ondorio garrantzitsuenak 1993tik 2004 arte.

	Frogatzeko hipotesiak	Ateratako ondorio garrantzitsuenak
IronEX I	Burdinak mugatzen du ekoizpen primarioa HNLC zonaldeetan.	Burdinak mugatzen du fitoplanktonaren hazkuntza-tasa. Fertilizazio saioetatik gerta daitezkeen beste ondorio argirik ez.
IronEX II	Burdinak mugatzen du ekoizpen primarioa HNLC zonaldeetan.	Berriro burdinak mugatzen du ekoizpen primarioa. Fitoplanktonaren hazkuntza IronEx I saioan baino handiagoa.
SOIREE	Burdinak mugatzen du ekoizpen primarioa Ozeano Antartikoan (Antartidako ekialdeko fronte polarrean). Fitoplanktonaren hazkuntza masiboak fixaturiko karbonoaren patua.	Burdinak mugatzen du produktibitatea Ozeano Antartikoan. Hondorantz karbonoaren garraiorik ez da ikusten.
EisenEX	Burdinak mugatzen du ekoizpen primarioa Ozeano Antartikoan (Antartidako ekialdeko fronte polarrean zehar). Simulatoriko burdinaren gehiketak azal ditzake glaziazio arteko aldikoan dauden atmosferako CO <sub>2</sub> -ren kontzentrazio txikiak.	Burdinak mugatzen du produktibitatea Ozeano Antartikoan. Fitoplanktonaren hazkuntza masiboaren patua ez da ezagutzen. Burdinak fitoplankton-andui batzuegan baino ez du eraginik.
SEEDS I	Burdinak mugatzen du ekoizpen primarioa Ozeano Bare azpiartikoan. Fitoplanktonaren hazkuntza masiboak fixaturiko karbonoaren patua.	Burdinak mugatzen du produktibitatea Ozeano Bare azpiartikoan. Diatomeoen garrantziaren handipena. Karbonoaren hondorantzko garraio txikia.
SOFeX-S	Handi dezake fertilizazio saioak karbonoaren garraioa hondorantz?	Karbono Organiko Partikulatuaren garraio-fluxua handitzen da baina, ...
SOFeX-N	Silikatoaren eragina eta aldakortasun geografikoaren arabera erantzuna.	ez fitoplanktonaren hazkuntza masibogatik espero bezala.
SERIES	Burdinak induzituriko fitoplanktonaren hazkuntza masibogatik fixaturiko karbonoaren patua. Isas hondorantz karbonoaren garraioaren efizientzia.	Karbono gehiena bermineralizatzen da. Termoklinatik beherantz karbonoaren garraio ez-eraginkorra.
EIFEX	Burdinaren gehiketak fitoplankton komunitatearen egitura eragiten du. Karbonoaren xurgapenaren efizientzia- eta bermineralizazio-tasak.	Pikofitoplanktonaren beherakada. Fixaturiko karbono gehiena ez zen bermineralizatu.
SEEDS II	Aztertzea, SEEDS I saioan bezala, baina epealde luzeagoan fitoplanktonaren eta karbonoaren patua.	Fitoplanktonaren hazkuntza masiborik ez. Zooplanktonak eragindako harrapatuzaren gorakada.
SAGE	Burdinaren gehiketaren eragina atmosfera eta haizearen arteko gasen fluxuan. Atmosferako CO <sub>2</sub> -ren beherakada eta (DMS) dimetil sulfuroen ekoizpena.	a Klorofilaren kontzentrazioa bikoiztu egin arren, ez dago DMS-ren ekoizpenean eta CO <sub>2</sub> -aren ezabapenean ere aldaketa argirik.
FeeP	Jarduera biologikoan burdinaren eta fosforoaren kontrolen elkarrekintza Ipar Ozeano Atlantikoan.	Nitrogenoaren finkapenaren gorakada. Ekoizpen primarioaren gorakadarik ez. Karbonoaren esportapena ez zen neurtu.

*Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa  
klima-aldaketaren aurkako tresna interesgarria ote?*

---

zuen. 2002an, SOFeX (Southern Ocean Iron Experiment) fertilizazio saioan (14, 15), frogatu zen Ozeano Antartikoa fertilizatu ondoren karbono organiko partikulatuaren itsas hondoranzko fluxua handitzen zela. Hala ere, fluxuaren handipena ez zen hazkuntza masibo naturala gertatzen zenean bezain handia. Zoritxarrez, ezin izan zuten fitoplanktonaren hazkuntza masiboaren bukaera ikusi. Urte honetan bertan, SERIES (Subarctic Ecosystem Response to Iron Enrichment Study) fertilizazio saioa ere egin zen Ozeano Bare azpiartikoan, eta karbono gehiena gainazalean protozoook eta bakterioek bermineralizatzen zutela ikusi zen (16). Xurgaturiko karbonoaren portzentaia txiki bat (% 8) baino ez zen eramaten itsas hondoraino. Portzentaia hau hazkuntza masibo natural batean sakontzen denarena baino txikiagoa da. Ikerlarien ustez, karbonoaren garraioaren efizientzia txikia izan liteke arazo larri bat klima-aldaketaren aurka burdinaren bidezko fertilizazioa erabilita.

Lau fertilizazio saio egin ziren 2004an. EIFEX (European Iron Fertilization Experiment) fertilizazio saioan egin zen fertilizazio handiena Ozeano Antartikoan, eta fitoplanktonaren oso hazkuntza masibogatik, itsas hondorainoko karbonoaren garraio handiena ikusi zen (17, 18). Kasu honetan, karbono gehiena ez zen bermineralizatu, hondorantz garraiatu baizik. SEEDS II saioan Ozeano Bare azpiartikoa fertilizatu zen baina fitoplanktonaren hazkuntza masiboa ez zen gertatu agian zooplanktonaren dentsitatearen handipenagatik (19). SAGE (Surface-Ocean Lower-Atmosphere Studies Air-Sea Gas Exchange) saioan ere ez zen karbonoaren garraioaren handipenik aurkitu. Kasu honetan, burdina gehitu ondoren klorofilaren kontzentrazioa gutxi handitu zen, agian argiak eragingo zuen fitoplankton-hazkuntzaren mugakortasunagatik (20). Bukatzeko, FeeP (Iron-enrichment experiment) saioan, burdinaren eta fosforoaren bidez fertilizatu zen LNLC (Low Nutrient Low Chlorophyll) zonaldea den Ipar Ozeano Atlantikoa, eta nitrogenoaren finkapena bultzatu zen baina ez ordea produktibitatea (21, 22). Karbonoaren garraioa ez zen saio honetan neurtu.

Emaitza hauek, burdinaren bidezko fertilizazioari fitoplankton komunitateak ematen dion erantzuna argitzeaz gain, berdin adierazten dute HNLC zonaldeetako burdinaren eskasiak mugatzen duela produktibitatea. Baina emaitzak oso aldakorrek dira eta informazio gehiago behar da CO<sub>2</sub>-ren xurgapenean burdinak duen efizientzia egiaztatzeko. Nagusiki, ondorioztatu da burdinaren fertilizazioaren bidezko CO<sub>2</sub>-ren xurgapenean eragin handia dutela aldakortasun biologikoak, geografikoak eta ozeanografikoak eta karbonoaren xurgapenari buruzko orokortasunik ezin dela finkatu (23). Honetaz gain, saio batzuek adierazten dute prozesu desberdinak direla karbonoaren gainazaleko xurgapena, itsas hondoranzko garraioa eta hondoko bahiketa. Karbonoaren portzentaia aldakor bat xurgatu ondoren hondorantz garraiatzen da. Garraiatzen den bitartean gerta daiteke zooplanktonak eta prokariotoek karbono asko bermineralizatu eta berriro gainazalerantz itzul-

tzea. Horrela, bahituriko karbonoaren kantitatea alda daiteke prozesu hauen indarren arabera.

### **Fertilizazio saioetatik eredu ekologikoetara**

Eskala txikian egindako fertilizazio saioetatik ezin dugu zehaztu zer gertatuko litzatekeen Ozeano Antartiko osoa fertilizatuko bagenu, edo zeintzuk izango liriatekeen ondorioak karbonoaren bahiketean fertilizaziotik 100 urte edo denbora gehiago igaro ondoren. Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioaren eragina estimatzeko eredu ekologiko desberdinak proposatu eta garatu dira. Hasieran, eredu hauek, azaldu nahi zuten zein izan litekeen itsasoaren erantzuna fertilizazio saioa eskala handikoa izango baltz. Hauen artean azpimarratzekoa da 1991an Princeton Unibertsitatean egindakoa (24). Eredu honek, itsasoaren gainazaleko ekologia kontuan hartuz, estimatu zuen Ozeano Antartiko osoan burdina-fertilizazioaren bidezko fitoplanktonaren hazkuntzaren mugakortasuna kentzekotan zer gertatuko litzaiokeen atmosferako CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioari eta itsasoaren kimikari 100 urteetan. Eredua garatzerakoan haiek onartu zuten burdinaren mugakortasuna kenduta makroelikagai eskuragarri guztiak erabiliko liriatekeela. Eredu honen arabera, burdinaren mugakortasuna Ozeano Antartiko osoari kenduko bagenio karbonoaren bahiketaren gorakada 1-1,5 Gt C/urte-koa izango litzateke (98-181 Gt C 100 urteetan). Kantitate hori 100 urtean askapen antropogenikoaren % 20a izan daiteke gutxi gorabehera. Edonola ere, horixe izan daiteke eredu honek proposaturiko estimazioa handiena, Ozeano Antartiko osoaren fertilizaziogatik gertatutako elikagai guztien ezabapena hartzen duelako kontuan.

2003an egindako ereduak (25) estimatu nahi zuen zein zen burdinaren bidez fertilizatu ondoren ponpa biologikoan elikagaien ezabapenak ekar zezakeen eragin negatiboa. Eredu honen arabera, fertilizazioak karbonoaren bahiketa alde batetik positiboki eragingo luke fitoplankton gehiago hazterakoan, itsasoko gainazaletik karbono gehiago jorratzen delako itsas hondorantz. Baina bestaldetik, fertilizazioak karbonoaren bahiketa jaitziko luke, batzuetan itsasoan gertatuko diren aldaketengatik bahiketa prozesuaren beherakada indartsuagoa delako produktibitatearen gorakada baino. 2006an fertilizazio saioetan oinarrituz estimatu ziren produktibitatea, garraioa eta bahiketa (26). Ikertzaileen ustez, Ozeano Antartikoan gertatuko litzateke burdinaren gehiketak eragindako karbonoaren bahiketaren % 90a. Burdinaren bidezko fertilizazioaren ondorioz produktibitatea handitzen den arren, produkzio honen portzentaia bat baino ez da garraiatzen, eta garraioaren oso portzentaia txikia baino ez da bahitzen. Gainera fertilizatu bezain laster, edo handik urte batzuetara garraiatzen den karbonoaren kantitatea denborarekin jaitziz doa. Eredu honen arabera garraioaren kantitatea 3,8 Gt C/urte-tik 1,8 Gt C/urte-ra jaisten da lehenengo urteetan, 100 urteetan batez besteko bahiketa 0,3-1 Gt C/urte izanda (gutxi gorabehera

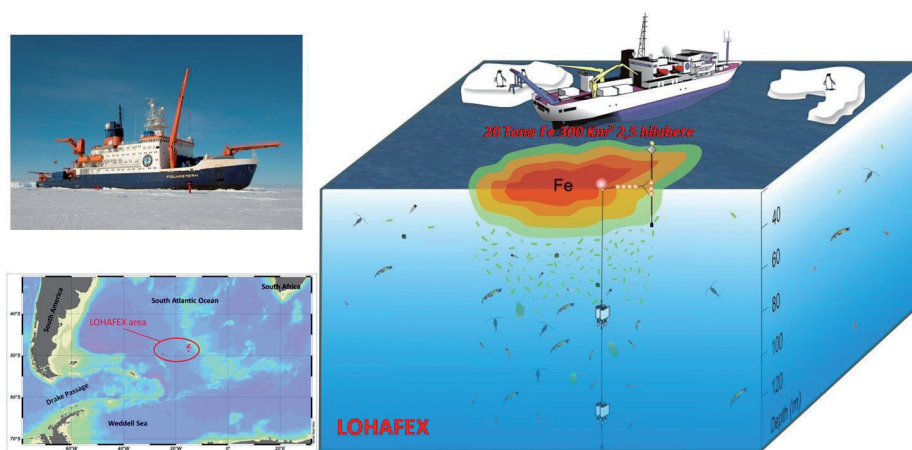
*Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa  
klima-aldaketaren aurkako tresna interesgarria ote?*

70 Gt C 100 urteetan). 2008an egindako ereduaren arabera, atmosferako CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioaren beherakada 0,9 Gt C/urte-koa izango litzateke ozeano guztien burdinaren mugakortasuna ezabatzekotan (27). Orokorrean eredu gehienek estimatzen dute urtero Gt bat karbono (bilioi bat tona) bahi daitezkeela atmosferatik, burdina-fertilizazioaren bidez. Hala ere, badaude beste eredu matematiko batzuk, adibidez MIT eredu (28), non garrantzi handiagoa ematen zaion argiaren mugakortasunari, burdinaren mugakortasunari baino. Horrela, burdinaren bidezko fertilizazioak eragiten duen CO<sub>2</sub>-ren ezabapenaren efizientzia jaitsi egiten da.

### LOHAFEX fertilizazio saioa 2009an

Fertilizazio saioek egiaztatu dute burdinaren gehiketak fitoplanktonaren hazkuntza bultzatzen duela HNLC zonaldeetan, baina ez dago argi atmosferatik xurgaturiko CO<sub>2</sub> bahitzen den edo bermineralizatzen den. Oraingoz erantzunik gabeko zalantza asko dauden arren emaitzak ez dira Martinen burdina-hipotesiak iradoki bezain onak. Ozeano Antartikoan egindako lan guztien datuak kontuan hartuz, esan daiteke burdinaren gehiketak 4.347 mol C/mol Fe handitzen duela disolbaturiko karbono ezorganikoaren xurgapena. Onartzen badugu xurgatzearen % 20a itsas hondoa bahitzen dela, prozesuaren efizientzia 870 mol C/mol Fe dela esan dezakegu. Hau da, espero baina 200 aldiz baxuagoa (29).

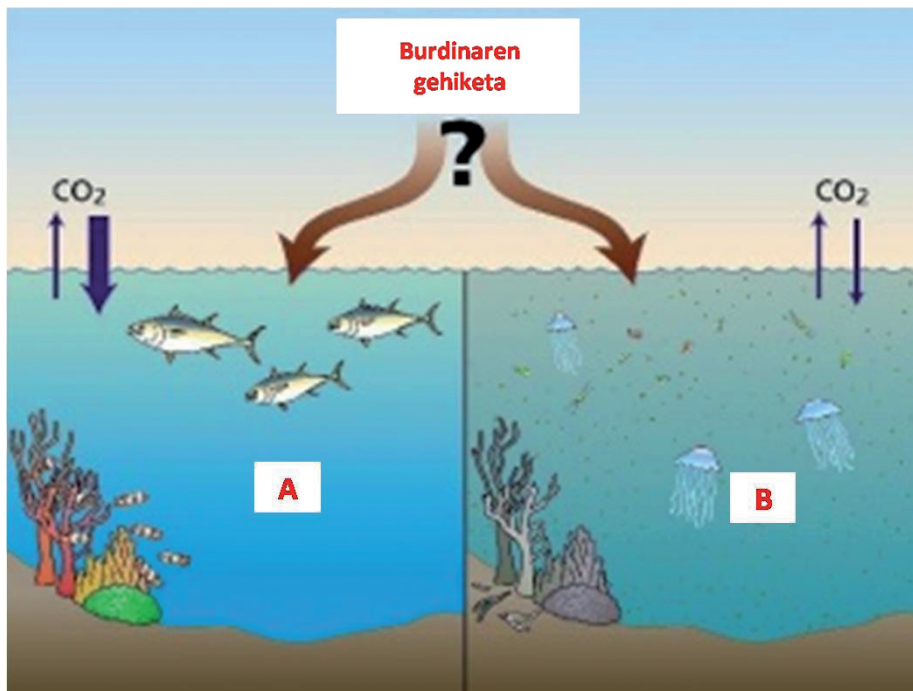
Saio batzuetan ikusi zen fixaturiko karbono guztia ez zela sedimentatzen. Sedimentazio tasak espero baino 100 aldiz txikiagoak ziren. Gainera, ez zegoen ondo aztertuta zeintzuk ziren fertilizazioaren eraginagatik itsas komunitateetan gerta litezkeen aldaketak. Hau aztertzeko, 2009an, Polars-tern itsasontziak LOHAFEX azken fertilizazio saioa egin zuen (14. irudia).



14. irudia. LOHAFEX fertilizazio saioa.

Kanpaina ozeanografiko honetan 40 egunean burdina partikulekin (20 tona burdin sulfatoarekin) fertilizatu ziren Hego Ozeano Atlantikoko 300 km<sup>2</sup>, eta partikulen sedimentazioa eta itsas komunitateak aztertu ziren. Aztertu nahi zen burdinaren bidezko fertilizazioaren ondorioz mikroalgen hazkuntza masiboaren eragina zein zen, alde batetik itsasoaren eta atmosferaren arteko CO<sub>2</sub>-ren elkartrukean, eta bestaldekik, ingurune pelagikoetako eta bentonikoetako osaeran eta erlazio trofikoetan. HNLC zonalde hau aukeratu zen aintzinean burdinaren kontzentrazioa handiagoa zela pentsatzen delako. Balea urdinak desagertutakoan gainazaleko burdinaren eskuragarritasuna txikitu egin zen uretako planktonentzat. Hori dela-eta, fitoplanktonaren eta bere harrapari krillaren dentsitateak jaitsi egin ziren. Beraien hipotesiaren arabera gehituriko burdina partikulek fitoplanktonaren hazkuntza estimulatuko lukete eta fitoplanktonaren sedimentaziotatik atmosferatik igarotako CO<sub>2</sub> gehiago ezabatuko litzateke.

Baina gauzak ez ziren atera haiek espero bezala. Egun batzuk igaro ondoren fitoplanktonaren hazkuntza masiboa ikusi bazuten ere, koepodo gosean «ehiza-txakurra» agertu eta fitoplanktona ezabatu zen. Honen ostean, anfipodoen kantitate handiak agertu ziren koepodo hauetaz baliatuz hazita (30). Anfipodo hauek balea eta txibientzako harrapakin bihur litezke-



**15. irudia.** Burdinaren gehiketagatik sor daitezkeen bi sistema: A. Orekatua eta CO<sub>2</sub> asko xurgatzen duena; B. Desorekatua eta CO<sub>2</sub> gutxiago xurgatzen duena.

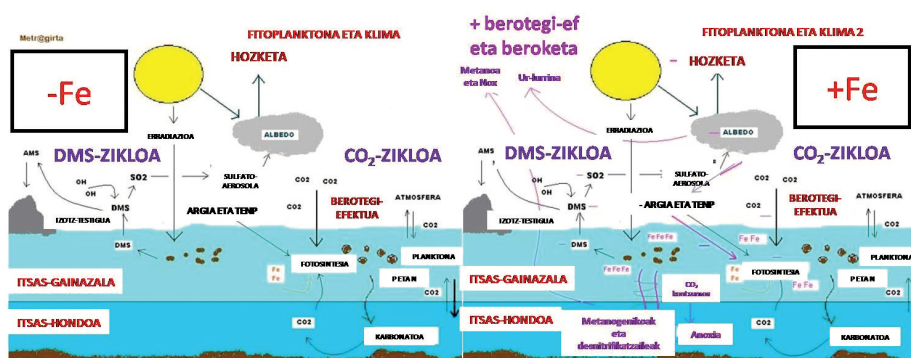


*Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa  
klima-aldaketaren aurkako tresna interesgarria ote?*

larik, harrapakin hauen dentsitateak igo litezke. Beraz, fixaturiko karbono gehiena azkar bermineralizatu zen bakarrik karbono kantitate txikia bahituta. Azken fertilizazio saio honetatik atera diren emaitzek adierazten dute itsasoko kate trofikoak oso konplexuak dela eta edozein aldaketak alda deza-keela bere funtzionamendua. Burdinaren gehiketak sor dezake itsas sistema orekatua, non CO<sub>2</sub> asko xurgatzen den, edo sistema desorekatua non xurgapena askoz txikiagoa den (15. irudia).

**Burdinaren bidezko fertilizazioaren kontraesanak**

Fitoplankton populazioaren gorakada bere hazkuntzarako ere kaltegarria izan daiteke mundu mailako aldatzearen aurkako borrokan eragozpen bihurtuta. Dimetilsulfonio propionatoa (DMSP) koantitatiboki fitoplanktonaren sufre-konposatu garrantzitsuenak da, bere metabolismorako beharrezkoa baita. Fitoplanktona hildakoan, sufredun konposatu hau uretara heltzen da. Bertan itsas mikrobioek degradatzen dute eta bi konposatu hegazkor askatzen dira: metanotiola eta dimetil sulfuroa (DMS). DMS-aren askapenagatik itsasoko gainazala ase egiten da, eta DMS itsasotik atmosferara garraiatzen da. Atmosferara helduta, oxidatu egiten da eta sufre oxidoa sortzen da. Honen ostean, sulfato-aerosolak sortzen dira. Aerosol hauek hodeiak sortzeko kondentsazio-nukleo bihurtzen dira eta hodeien sorrera bultzatzen dute. Hego Hemisferioan ez du garrantzia handirik, fertilizazioaren ondorioz mikrobioek atmosferara askatzen duten sufredun konposatu hegazkor honen kantitatea askapen antropogenikoarena baino txikiagoa delako. Ipar Hemisferioan, ordea, garrantzia izan lezake fitoplanktona DMS-aren ekoizle garrantzitsuenak izan litekeelako. DMS askoren sorreraren ondorioz, hodeien kantitatea eta loditasuna handitzean itsasoetaraino hel daitekeen eguzkiko argia, jaitsi egiten da eta honen ondorioz albedo efektua areagotzen da (16. irudia). Beraz, itsasoraino argi gutxiago helduta,

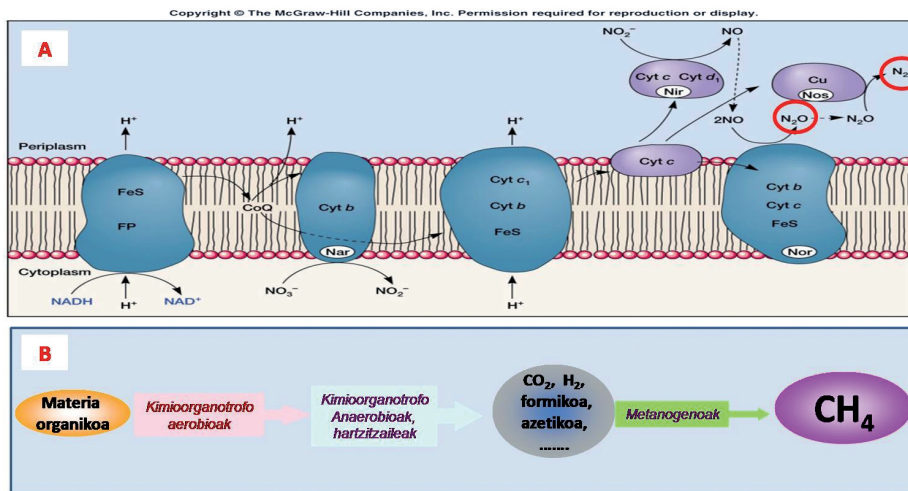


**16. irudia.** Fitoplanktona eta klima. CO<sub>2</sub>- eta DMS-zikloak itsasoan. -Fe. Burdinaren gehiketarik gabe. +Fe. Burdinaren gehiketaren eragina albedo efektuan.

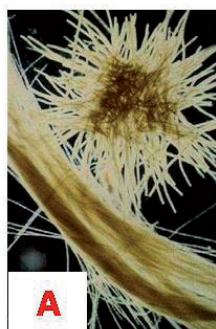
fitoplanktonaren metabolismoa eta hazkuntza jaitsi egingo lirateke eta atmosferatik xurgatzen den CO<sub>2</sub>-ren kantitatea jaitsi eta berotegi efektua gogortuko litzateke (31).

Ingurune anoxikoen agerpena izan daiteke fertilizazioaren beste alde kaltegarri bat. Fitoplanktonaren hazkuntza masiboak zelula-heriotzaren handipena ekarriko luke. Fitoplankton-zelulak hil ondoren, sedimentazio-gatik itsas hondorantz garraiatzen dira. Beraien degradazioan zehar oxigenoa kontsumitzen denez ur zutabeen ingurune anoxikoak sor daitezke. Horrelako ingurune oxigenorik gabeak sortuta, anaerobioak diren arkeo metanogenikoen eta bakterio desnitrifikatzaileen garrantzia koantitatiboa handitu egingo litzateke. Prokarioto hauek CO<sub>2</sub>-rena baino berotegi efektu handiago eragiten duten metanoa (CH<sub>4</sub>) edota oxido nitroso (N<sub>2</sub>O) bezalako nitrogeno-oxidoak sortzen dituzte (17. irudia) eta ingurugiroko zorigaitz larria sor liteke (32, 33, 34). Gainera desnitrifikatzaileak asko hazten badira mugakorra den nitrogeno elikagaia N<sub>2</sub>-raino erreduzituko litzateke eta atmosferara heldu eta ur-sistemako nitrogenoaren kontzentrazioa jaitziko litzateke. Honen ondorioz *Trichodesmium* bezalako zianobakterio N<sub>2</sub>-finkatzaileen populazioa handitu (18. irudia) eta nitrogenoa sistemara itzul daiteke. Edonola ere, zianobakterio finkatzaile hauek egindako N<sub>2</sub>-ren finkapenak ez du inoiz neutralizatuko sorturiko efektu negatiboa. Fitoplanktonaren hazkuntza masiboa dela-eta, beste eragin kaltegarri bat ere gerta daiteke: baliteke fitoplanktonak ekoizten duen metilo-haluroek gora egin eta ozono-geruza mehetzea (34) eta berotegi efektua gogortzea.

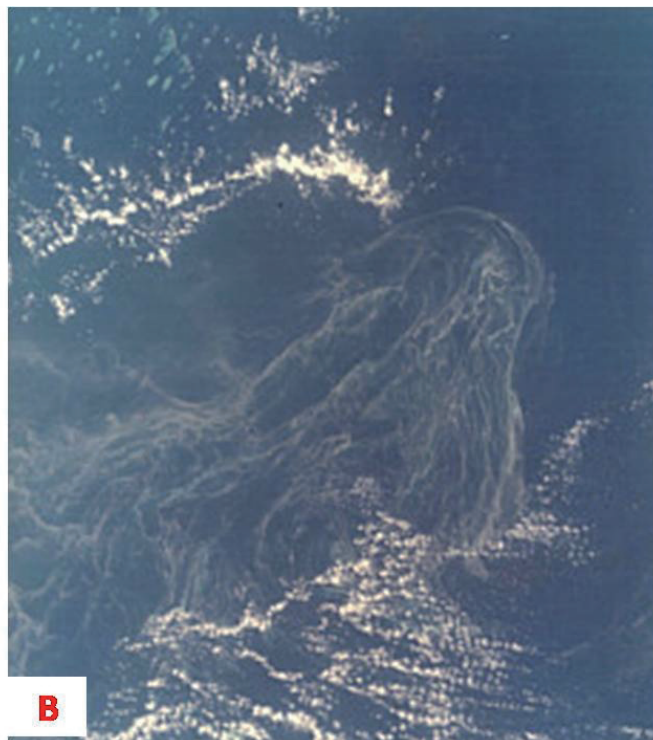
Arnasketa anaerobikoak



17. irudia. Burdinaren bidezko fertilizazioak bultzatuz ditzakeen arnasketa anaerobikoak. A. Desnitrifikazioa; B. Metanogenesia.



**A**  
*Trichodesmium*

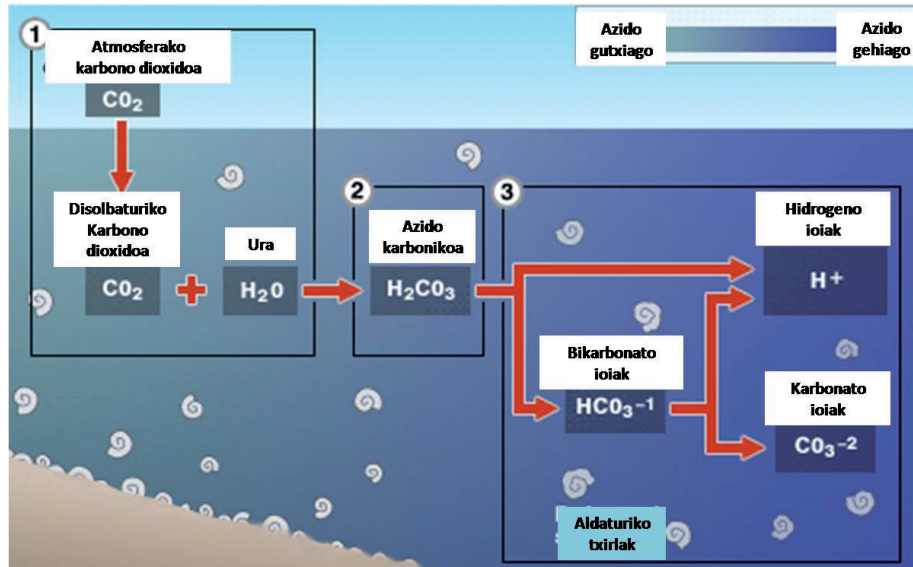


**B**

*Trichodesmium*-en hazkuntza masiboa

**18. irudia.** A. *Trichodesmium* zianobakterioa mikroskopioan; B. *Trichodesmium*-en hazkuntza masiboa itsasoan.

Burdinaren bidezko fertilizazioaren ondorioz, fitoplanktonaren hazkuntza masibogatik itsasoan sarturiko CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioa handituko da eta horren ondorioz gerta daiteke itsasoaren azidifikazioa bultzatzea (33). CO<sub>2</sub> disolbatzen denean, urarekin erreakzionatu eta oreka bat sortzen du azido karboniko (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), bikarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) eta karbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) konposatuen artean (19. irudia). Konposatu hauen arteko harremana tenperatura eta gazitasunaren menpe dago. Uretan disolbaturiko CO<sub>2</sub>-ren kontzentrazioa handitzerakoan hidrogeno ioien kontzentrazioa handitu, pH jaitsi eta azidifikazioa eragiten da. Azidifikazio honek aldatu egingo du sakontasuna non karbonato-biomineralak disolbatzen diren. Honek bizidun kalkareoei (kokolitoferidoak, koralak, foraminiferoak, ekinodermoak, krustazeoak eta moluskoak) ondorio kaltegarriak ekarriko lizkieke. Bizidun hauek kaltzio karbonatoa erabiltzen dute kaltzita edo aragonitua sortzeko eta hauetaz baliatuz zelula-gainazalak edota eskeletoak osatzeko. Normalean kaltzita eta aragonitua egonkorrak dira, itsasoan karbonato ioia asetze-kontzentrazioetan agertzen delako. Baina pH jaisten den heinean, ioi honen kontzen-

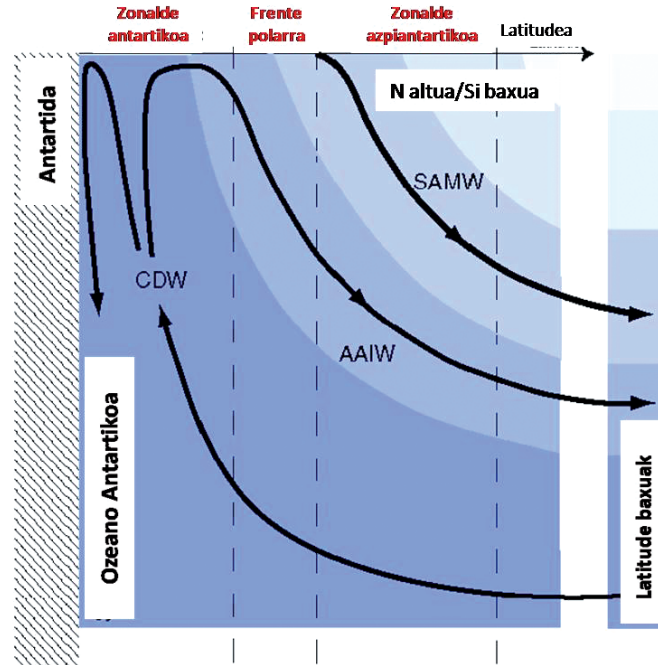


19. irudia. Mundu mailako itsasoaren azidifikazioa aldaketa globalagatik.

trazioa murrizten doa. Asegabe-egoeran dagoenean, karbonato-egiturak disolbatu egiten dira, eta murriztu egiten dute horrelako bizidunen hazkuntzarako bizilekua. Azidifikazioak eragiten duen deskalzifikazioaz gain, beste kalte zuzen batzuk eragin ditzake izaki bizidunen fisiologian edota ugalketan, adibidez hiperkapnia (gorputzaren fluidoan azidifikazioa) (35).

Bukatzeko, azpimarratzekoa da burdinaren bidezko fertilizazioaren ondorioz beste zonaldeetan gerta daitekeen aldaketa. HNLC zonalde batean fertilizazioaren bidez produkzio biologikoa handitzen bada, elikagai gehienak hondoan metatu eta beste zonalde batean produkzioa jaitsi daiteke. Adibidez, Ozeano Antartikoaren fertilizazioak beste zonalde batean eragin negatibo garrantzitsua sor dezake. Fertilizatu ostean, elikagai gehienak gainazaletik 1.000 m baino sakontasun handiagoetara eramango lirateke. Hori dela-eta, elikagai hauek gainazalera itzultzeko bide nagusia (20. irudia), hots elikagaien azalratzea, blokeatu egiten da, eta normalean haizeak Ipar Ozeano Antartikorantz egiten duen elikagai hauen garraioa ezabatu egiten da. Zonalde honetan ekoizpen biologikoa % 75a jaitsi egiten da. Beraz, Hego Ozeano Antartikoaren fertilizazioaren ondorioz hango ekoizpena handitzen den arren, Iparraldean eta tropikoan jaitsi egingo litzateke, hondotik gainazalera elikagaien garraioa jaistean. Izan ere, fertilizatu gabe tropikoan ekoizpen handia gertatzen da elikagaien agerpenagatik. Nahiz eta azterturik ez egon, Ekuadorreko Ozeano Barearen fertilizazioan antzerako eragina ere gerta daiteke. Zonalde hori fertilizatzeak eragin positiboa ekarriko luke leku honetako ekoizpenerako, baina

*Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa  
klima-aldaketaren aurkako tresna interesgarria ote?*



**20. irudia.** Ur-masen eta elikagaien mugimendua Ozeano Antartikoan (CDW: ur sakon zirkunpolarra; AAIW: Antartikoko tarteko ura; SAMW: Ur azpianartikoa).

eragin negatiboa Peruko elikagaien azalareatzean. Hemen, elikagaien kontzentrazioak jaitsita, hango ekoizpen biologikoaren jaitsiera gertatuko litzateke.

### **Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioaren etorkizuna**

Burdinaren bidezko HNLC zonaldeen fertilizazioa, baliabide interesgarria izan daiteke atmosferatik CO<sub>2</sub> xurgatzeko eta itsasoetako hondorantz karbonoa garraiatzeko, baina oraingo ez da guztiz ezagutzen zein izan daitekeen eragina zonalde hauetako eta elikagaien azalartze-lekuetako plankton-komunitateen egituran, CO<sub>2</sub> xurgatzeko ahalmenean, klimatologian, zonalde anoxikoen sorreran, biogasaren ekoizpenean eta azidifikazioan besteak besteetan. Hau kontuan hartuz, zergatik ematen ote zaio hain garrantzia handia burdinaren bidezko fertilizazioari? Izan ere, alde batetik burdinak itsasoan duen betebeharra ondo ezagutzen ez den arazo zientifiko garrantzitsua izanda, fertilizazio saioek hobeto ulertzea baimenduko dute. Bestaldetik, interes ekonomikoak daude. Gastu guztiak (itsasontzia, jendea eta materiala) kontuan hartuz, fertilizazioaren bidez tona bat CO<sub>2</sub>-ren ezabapenak gutxi gorabehera 1,5 euro balio izango luke, gaur egun beste



metodoen bidez 75 euro izanda. Beraz, fertilizazioaren erabilerak baimendu luke CO<sub>2</sub>-ren kantitate handiak bahitzea koste baxuarekin. CO<sub>2</sub> asko sortzen duten herri eta enpresa batzuek, tresna honen bidez haien industria-jardureetan sorturiko CO<sub>2</sub>-ren kantitate handiak ezabatuko lituzkete karbonoaren merkatuan.

2009.eko maiatzaren 30ean Anizkoiztasun Biologikoaren Bilerak beraien 9. batzarrean, eskatu zuen itsasoaren fertilizazioa ez onartzea justifikatzen duenaren oinarri zientifikoa (besteak beste arriskuen balorazioa) ondo ezagutu arte eta, aktibitate hauek egiteko erregulazio eta mundu mailako kontrola gardena eta eraginkorra izan arte. Beraien ustez salbuespen bakarrak ikerkuntzarako eskala txikian eta kostaldeetan egiten diren fertilizazio saioak dira.

Etorkizunari begira, itsasoa fertilizatu baino lehen ondo ezagutu beharko genituzke horren ondorioz gerta daitezkeen efektuak. Mediterraniar Itsasoan egindako ikerketa baten arabera, fosforoaren bidezko itsasoaren fertilizazioa interesgarriagoa izan daiteke karbonoa bahitzeko burdinaren bidezko fertilizazioa baino (36). Gainera, nahiz eta fosforoaren bidezko fertilizazio egokirik oraindik egin ez den, fosforoaren kontzentrazioa handitzen doa nekazaritza-jarduerengatik, eta itsasoraino fosforo gehiago helitzen da, eta erraztu egiten da atmosferatik itsasoranzko CO<sub>2</sub>-ren xurgapena. Klima-aldaketari aurre egiteko burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa baliabide egokia ala ez izanda, eguzkia, haizea, ura edota biomasa bezalakoetan oinarritutako energia berriztagarrien funtsezko zeregina sustatzen duten politiken bidez baino ezin da planetaren berotzea mantendu edo jaitsi. Mundu mailako berotzea saihestezina da gaur egun, baina geroak erabakiko du ea bere eragina arin ahul daitekeen edo neurritz kanpoko den eta kalte atzeraezinak sortzen dituen.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) PETERS, G.P.; MARLAND, G.; LE QUÉRE, C.; BODEN, T.; CANADELL, J.G. eta RAUPACH, M.R. (2011). «Rapid growth in CO<sub>2</sub> emissions after the 2008-2009 global financial crisis». *Nature Climate Change* 9, 1-3.
- (2) MEEHL, G.A.; ARBLASTER, J.M.; FASULLO, J.T.; HU, A. eta TRENBERTH, K.E. (2011). «Model-based evidence of deep-ocean heat uptake during surface-temperature hiatus periods». *Nature Climate Change* 1, 360-364.
- (3) HART, T. (1934). «On the plankton of the Southwest Atlantic and the Bellingshausen Sea». *Discovery Reports* 8, 1-268.
- (4) MARTIN, J.H. (1990a). «A new iron age or a ferric fantasy». *JGOFs Newsletter* 1, 5-11.
- (5) MARTIN, J.H. (1990b). «Glacial-interglacial CO<sub>2</sub> exchange: The iron hypothesis». *Paleoceanography* 5, 1-13.



*Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa  
klima-aldaketaren aurkako tresna interesgarria ote?*

---

- (6) MARTIN, J.H.; GORDON, R.M.; FITZWATER, S. eta BROENKOW, W.W. (1989). «Vertex: phytoplankton/iron studies in the Gulf of Alaska». *Deep-Sea Research* 36, 649-680.
- (7) MARTIN, J.H.; GORDON, R.M. eta FITZWATER, S.E. (1990). «Iron in Antarctic waters». *Nature* 345, 156-158.
- (8) MARTIN, J.H.; COALE, K.H.; JOHNSON, K.S.; FITZWATER, S.E.; GORDON, R.M.; TANNER, S.J.; HUNTER, C.N.; ELROD, V.A.; NOWICKI, J.L.; COLEY, T.L.; BARBER, R.T.; LINDLEY, S.; WATSON, A.J.; VAN SCOY, K.; LAW, C.S.; LIDDICOAT, M.I.; LING, R.; STANTON, T.; STOCKEL, J.; COLLINS, C.; ANDERSON, A.; BIDIGARE, R.; ONDRUSEK, M.; LATASA, M.; MILLERO, F.J.; LEE, K.; YAO, W.; ZHANG, J.Z.; FRIEDERICH, G.; SAKAMOTO, C.; CHAVEZ, F.; BUCK, K.; ZOLBER, Z.; GREENE, R.; FALKOWSKI, P.; CHISHOLM, S.W. HOGE, F.; SWIFT, R.; YUNGEL, J.; TURNER, S.; NIGHTINGALE, P.; HATTON, A.; LISS, P. eta TINDALE, N.W. (1994). «Testing the iron hypothesis in ecosystems of the equatorial Pacific Ocean». *Nature* 371, 123-129.
- (9) COALE, K.H.; JOHNSON, K.S.; FITZWATER, S.E.; GORDON, R.M.; TANNER, S.; CHAVEZ, F.P.; FERIOLI, L.; SAKAMOTO, C.; ROGERS, P.; MILLERO, F.; STEINBERG, P.; NIGHTINGALE, P.; COOPER, D.; COCHLAN, W.P.; LANDRY, M.; CONSTANTINOU, J.; ROLLWAGEN, G.; TRASVINA, A. eta KUDELA, R. (1996). «A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean». *Nature* 383, 495-501.
- (10) BOYD, P.W.; WATSON, A.J.; LAW, C.S.; ABRAHAM, E.R.; TRULL, T.; MURDOCH, R.; BAKKER, D.C.E.; BOWIE, A.R.; BUESSELER, K.O.; CHANG, H.; CHARETTE, M.; CROOT, P.; DOWNING, K.; FREW, R.; GALL, M.; HADFIELD, M.; HALL, J.; HARVEY, M.; JAMESON, G.; LAROCHE, J.; LIDDICOAT, M.; LING, R.; MALDONADO, M.T.; MCKAY, R.M.; NODDER, S.; PICKMERE, S.; PRIDMORE, R.; RINTOUL, S.; SAFI, K.; SUTTON, P.; STRZEPEK, R.; TANNEBERGER, K.; TURNER, S.; WAITE, A. eta ZELDIS, J. (2000). «A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization». *Nature* 407, 695-702.
- (11) SMETACEK, V. (2001). «EisenEx: International team conducts iron experiment in Southern Ocean». *US JGOFS News* 11, 11-14.
- (12) ASSMY, P.; HENJES, J.; KLAAS, C. eta SMETACEK, V. (2007). «Mechanisms determining species dominance in a phytoplankton bloom induced by the iron fertilization experiment EisenEx in the Southern Ocean». *Deep-Sea Research Part I* 54, 340-362.
- (13) TSUDA, A.; KIYOSAWA, H.; KUWATA, A.; MOCHIZUKI, M.; SHIGA, N.; SAITO, H.; CHIBA, S.; IMAI, K.; NISHIOKA, J. eta ONO, T. (2005). «Responses of diatoms to iron-enrichment (SEEDS) in the western subarctic Pacific, temporal and spatial comparisons». *Progress in Oceanography* 63, 983-994.
- (14) COALE, K.H.; JOHNSON, K.S.; CHAVEZ, F.P.; BUESSELER, K.O.; BARBER, R.T.; BRZEZINSKI, M.A.; COCHLAN, W.P.; MILLERO, F.J.; FALKOWSKI, P.G.; BAUER, J.E.; WANNINKHOF, R.H.; KUDELA, R.M.; ALTABET, M.A.; HALES, B.E.; TAKAHASHI, T.; LANDRY, M.R.; BIDIGARE, R.B.; WANG, X.; CHASE, Z.; STRUTTON, P.G.; FRIEDERICH, G.E.; GORBUNOV, M.Y.; LANCE, V.P.;

- HILTING, A.K.; HISCOCK, M.R.; DEMAREST, M.; HISCOCK, W.T.; SULLIVAN, K.F.; TANNER, S.J.; GORDON, R.M.; HUNTER, C.N.; ELROD, V.A.; FITWATER, S.E.; JONES, J.L.; TOZZI, S.; KOBLIZEK, M.; ROBERTS, A.E.; HERNONDON, J.; BREWSTER, J.; LADIZINSKY, N.; SMITH, G.; COOPER, D.; TIMOTHY, D.; BROWN, S.L.; SELPH, K.E.; SHERIDAN, C.C.; TWINING, B. eta JOHNSON, Z.I. (2004). «Southern Ocean iron enrichment experiment: Carbon cycling in high — and low — Si waters». *Science* 304, 408-414.
- (15) BUESSELER, K.O.; ANDREWS, J.E.; PIKE, S.M. eta CHARETTE, M.A. (2004). «The effects of iron fertilization on carbon sequestration in the Southern Ocean». *Science* 304, 414-417.
- (16) HOFFMANN, L.J.; PEEKEN, I.; LOCHTE, K.; ASSMY, P. eta VELDHUIS, M. (2006). «Different reactions of Southern Ocean phytoplankton size classes to iron fertilization». *Limnology and Oceanography* 51, 1217-1229.
- (17) JACQUET, S.H.M.; SAYOVE, N.; DEHAIRS, F.; STRASS, V.H. eta CARDINAL, D. (2008). «Mesopelagic carbon remineralization during the European iron fertilization experiment». *Global Biogeochemical Cycles* 22, 1023-1032.
- (18) BOYD, P.W.; LAW, C.S.; WONG, C.S.; NOJIRI, Y.; TSUDA, A.; LEVASSEUR, M.; TAKEDA, S.; RIVKIN, R.; HARRISON, P.J.; STRZEPEK, R.; GOWER, J.; MCKAY, R.M.; ABRAHAM, W.; CRAWFORD, D.; HALE, M.; HARADA, K.; JOHNSON, K.; KIYOSAWA, H.; KUDO, I.; MARCHETTI, A.; MILLER, W.; NEEDOBA, J.; NISHIOKA, J.; OGAWA, H.; PAGE, J.; ROBERT, M.; SAITO, H.; SASTRI, A.; SHERRY, N.; SOUTAR, T.; SUTHERLAND, N.; TAIRA, Y.; WHITNEY, F.; WONG, S.E. eta YOSHIMURA, T. (2004). «The decline and fate of an iron-induced subarctic phytoplankton bloom». *Nature* 428, 549-553.
- (19) TSUDA, A.; TAKEDA, S.; SAITO, H.; NISHIOKA, J.; KUDO, I.; NOJIRI, Y.; SUZUKI, K.; UEMATSU, M.; WELLS, M.L.; TSUMUNE, D.; YOSHIMURA, T.; AONO, T.; ARAMAKI, T.; COCHLAN, W.P.; HAYAKAWA, M.; IMAI, K.; ISADA, T.; IWAMOTO, Y.; JOHNSON, W.K.; KAMEYAMA, S.; KATO, S.; KIYOSAWA, H.; KONDO, Y.; LEVASSEUR, M.; MACHIDA, R.J.; NAGAO, I.; NAKAGAWA, F.; NAKANISHI, T.; NAKATSUKA, S.; NARITA, A.; NOIRI, Y.; OBATA, H.; OGAWA, H.; OGUMA, K.; ONO, T.; SAKUGARI, T.; SASAKAWA, M.; SATO, M.; SHIMAMOTO, A.; TAKATA, H.; TRICK, C.G.; WATANABE, Y.; WONG, C.S. eta YOSHIE, N. (2007). «Evidence for the grazing hypothesis: grazing reduces phytoplankton responses of the HNLC ecosystem to iron enrichment in the western subarctic pacific (SEEDS II)». *Journal of Oceanography* 63, 983-994.
- (20) LAW, C.S. eta SAGE TEAM (2006). «Plankton, iron and climate». *Water and atmosphere* 14, 21.
- (21) REES, F.P.; NIGHTINGALE, P.D.; OWENS, N.J.P. eta PML FEEP TEAM (2007). «FeP-An in situ  $PO_4^{3-}$  and  $Fe^{2+}$  addition experiment to waters of the subtropical north-east Atlantic». *Geophysical Research Abstracts* 9.
- (22) KARL, D.M. eta LETELIER, R.M. (2008). «Nitrogen fixation enhanced carbon sequestration in low nitrate, low chlorophyll seascapes». *Marine Ecology Progress Series* 364, 257-268.

*Burdinaren bidezko itsasoaren fertilizazioa  
klima-aldaketaren aurkako tresna interesgarria ote?*

---

- (23) BOYD, P.W.; JICKELLS, T.; LAW, C.S.; BLAIN, S.; BOYLE, E.A.; BUESSELER, K.O.; COALE, K.H.; CULLEN, J.J.; DE BAAR, H.J.W.; FOLLOWS, M.; HARVEY, M.; LANCELOT, C.; LEVASSEUR, M.; OWENS, N.P.J.; POLLARD, R.; RIVKIN, R.B.; SARMIENTO, J.; SCHOEMANN, V.; SMETACEK, V.; TAKEDA, S.; TSUDA, A.; TURNER, S. eta WATSON, A.J. (2007). «Mesoscale iron enrichment experiments 1993-2005: synthesis and future directions». *Science* 315, 612-617.
- (24) SARMIENTO, J.L. eta ORR, J.C. 1991. «Three-dimensional simulations of the impact of Southern Ocean nutrient depletion on atmospheric CO<sub>2</sub>». *Limnology and Oceanography* 36, 1928-1950.
- (25) GNANADESIKAN, A.; SARMIENTO, J.L. eta SLATER, R.D. (2003). «Effects of patchy ocean fertilization on atmospheric carbon dioxide and biological production». *Global Biogeochemical Cycles* 17, 1050-1067.
- (26) AUMONT, O. eta BOPP, L. (2006). «Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies». *Global Biogeochemical Cycles* 20, 2017-2032.
- (27) JIN, X.; GRUBER, N.; FRENZEL, H.; DONEY, S.C. eta MCWILLIAMS, J.C. (2008). «The impact on atmospheric CO<sub>2</sub> of iron fertilization induced changes in the ocean's biological pump». *Biogeosciences* 5, 385-406.
- (28) DUTKIEWICZ, S.; FOLLOWS, M.J.; HEIMBACH, P. eta MARSHALL, J. (2006). «Controls on ocean productivity and air-sea carbon flux: an adjoint model sensitivity study». *Geophysical Research Letters* 33, 2603-2607.
- (29) DE BAAR, H.J.W.; BOYD, P.W.; COALE, K.H.; LANDRY, M.R.; TSUDA, A.; ASSMY, P.; BAKKER, D.C.E.; BOZEC, Y.; BARBER, R.; BRZEZINSKI, M.A.; BUESSELER, K.O.; BOYE, M.; CROOT, P.L.; GERVAIS, F.; GORBUNOV, M.Y.; HARRISON, P.J.; HISCOCK, W.T.; LAAN, P.; LANCELOT, C.; LAW, C.S.; LEVASSEUR, M.; MARCHETTI, A.; MILLERO, F.J.; NISHIOKA, J.; NOJIRI, Y.; VAN OIJEN, T.; RIEBESELL, U.; RIJKENBERG, M.J.A.; SAITO, H.; TAKEDA, S.; TIMMERMANS, K.R.; VELDHUIS, M.J.W.; WAITE, A.M. eta WONG, C-S. (2005). «Synthesis of iron fertilization experiments: From the iron age in the age of enlightenment». *Journal of Geophysical Research* 110, 1-24.
- (30) MAZZOCCHI, M.G.; GONZALEZ, H.E.; VANDROMME, P.; BORRIONE, I.; RIBERA D'ALCALA, M.; GAUNS, M.; ASSMY, P.; FUCHS, B.; KLASS, C.; MARTIN, P.; MONTRESOR, M.; RAMAIAH, N.; NAQVI, W. eta SMETACEK, V. (2009). «A non-diatom plankton bloom controlled by copepod grazing and amphipod predation: preliminary results from the LOHAFEX iron-fertilisation experiment». *Globec International Newsletter* 15, 3-6.
- (31) CHARLSON, R.J.; LOVELOCK, J.E.; ANDREAE, M.O. eta WARREN, S.G. (1987). «Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo, and climate». *Nature* 326, 655-661.
- (32) FUHRMAN, J.A. eta CAPONE, D.G. (1991). «Possible biogeochemical consequences of ocean fertilization». *Limnology and Oceanography* 38, 1951-1959.
- (33) DENMAN, K. (2008). «Climate change, ocean processes, and ocean iron fertilization». *Marine Ecology Progress Series* 364, 219-225.

- (34) LAW, C.S. (2008). «Predicting and monitoring the effects of large-scale ocean iron fertilization on marine trace gas emissions». *Marine Ecology Progress Series* 364, 283-288.
- (35) CAO, L. eta CALDEIRA, K. (2010). «Can ocean iron fertilization mitigate ocean acidification?» *Climatic Change* 99, 303-311.
- (36) KROM, M.D.; THINGSTAD, T.F.; BRENNER, S.; CARBO, P.; DRAKOPOULUS, P.; FILEMAN, T.W.; FLATEN, G.A.F.; GROOM, S.; HERUT, B.; KITIDIS, V.; KRESS, N.; LAW, C.S.; LIDDICOAT, M.I.; MANTOURA, R.F.C.; PASTERNAK, A.; PITTA, P.; POLYCHRONAKI, T.; PSARRA, S.; RASSOULZADEGAN, F.; SKJOLDAL, E.F.; SPYRES, G.; TANAKA, T.; TSELEPIDES, A.; WASSMANN, P.; WEXELS RISER, C.; WOODWARD, E.M.S.; ZODIATIS, G. eta ZOHARY, T. (2005). «Summary and overview of the CYCLOPS P addition Langrangian experiment in the Eastern Mediterranean». *Deep-Sea Research II* 52, 3090-3108.