



EUSKAL HERRIKO



Kultura eta Hizkuntza Politika Sailak
(Hizkuntza Politikarako Sailburuordetzak)
diruz lagundua

6€
129
ZENBAKIA
2021eko UZTAILA-ABUZTUA

Natura

MEDITERRANEOA LEHORTZEZA

KUATERNARIOKO GLAZIAZIOAK

PLIOZENOKO KLIMA
BEROA

MIOZENOKO KLIMA
ALDAKORRA

LURRA IZOZTU EGIN OTE ZEN?

KANBRIARREKO LEHERKETA

HASI ERAKO BEROA

ORDOVIZIOARREKO
GLAZIAZIOA

AZEN GLAZIAZIOKO
ALDAKORTASUN

AZKEN GLAZIAZIOA

DESGLAZIAZIOA



LURREKO KLIMAREN ALDAKETA HANDIAK

LURREKO KLIMAREN ALDAKETA HANDIAK



**EUSKAL HERRIKO
NATURA**



Hezkuntza, Hizkuntza Politika eta Kultura Sailak
(Hizkuntza Politikarako Sailburuordetzak) diruz lagundua

IRAUNGITZEKO ZORIAN DAUDEN ESPEZIEAK DEFENDATZEKO ELKARTEA

**ZURE NATUR ETA ZOOLOGIA
ALDIZKARIA**

AURKIBIDEA

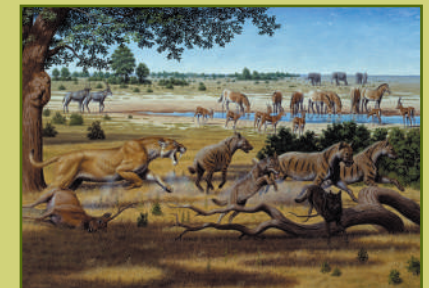
EUSKAL HERRIKO NATURA - 129.zk - 2021eko UZTAILA-ABUZTUA - 6€



Kuaternarioaren aurreko klima	4
Kanbriarraurrea	4
Biziaren hasiera	5
Oxigenoaren ugartzea	6
Berotegi-gasak gutxitzea	7
Lurra izoztu egin ote zen?	8
Metanoaren eta karbono dioxidoaren murrizketa	9
Lurraren ardatza zeharrragoa?	10
Era Primarioa (Paleozoikoa)	11
Ordoviziarreko glaziazioa	12
Karboniferoaren amaierako glaziazioa	13
Siberiako sumendiak	14
Era Sekundarioa (Mesozoikoa)	15
Klima ozeanikoagoa	17
Karbonoaren sedimentazio handia	18
Chicxulub-eko meteoritoa	19
Dekkan-eko erupzioak	20
Era Tertiarioa	21
Goi Paleozenoko Maximo Termikoa	22
Hoztearen hasiera	23
Oligozenoa: izotzak Antartika estaltzen du	24
Miozenokoklima aldakorra	25
Tibet altzatzea	26



Mediterraneo lehortzea	26
Pliozenoko klima beroa	28
Kuaternarioako trantsizioa	29
Pleistozenoa	30
Kuaternarioko glaziazioak	30
Eemdar glaziazioarte	31
Klimaren egonkortasuna	32
Noiz eta non hasi zen glaziazioarte?	33
Berotegi-gasen eginkizuna	35
Metanoa	36
Lurruna	37
Azken glaziazioko aldakortasun klimatikoak	38
Azken glaziazioaren faseak	38
Aldakortasun klimatikoa	39



Heinrich gertaerak	40
Tropikoko aldakortasuna	41
Azken maximo glaziarra	42
Laurentidar eta finoeskandinaviar izotz-estalkiak	43
Barens-Kara izotz-estalkia	44
Idortasun glaziarra	45
Salbuespen hezeak Amerikan eta Asian	46
Oxido nitrosoa	49
Karbono dioxidoa	48
Itsas mailaren igoera	49
Faseak eta desfaseak Artikoaren eta Antartikaren artean	50
Younger Dryas	50



**EUSKAL HERRIKO
NATURA**

Zuzendaria: Fernando Pedro Pérez.
Erredakziburua: Iñaki Landaluze.
Kolaboratzaileak: Nerea Urtaran, Miren Alustiza, Oskar Azkona, Fidel Korta.
Iñaki Iriondo, Jon Zubiri, Elena Azkarreta, Xabier Aramburu, Kepa Alustiza.
Argazkilari-taldea: Edurne Urkizu, Aitor Zubizarreta, Xabier Urreta, Izaskun Loidi.
Maketatzailea: Cristina Urionabarrenebtxea.
Legezko gordailua: BI-2452-02. **ISSN:** 1695-4645
Web: adeve.es **Aleak:** 2.000

Erredakzioa:
Av. Madariaga, nº. 47-6º C - Esc.1 - 48014 BILBAO.
Tel: (94) 4 75 28 83. e-maila: adeve.1991@gmail.com

Argitaratzailea:
Iraungitzeko Zorian Dauden Espezieak
Defendatzeko Elkarte.



EHAA-1996ko otsailak 7, asteazkena.
3/1996 DEKRETUA, urtarilaren 9koa, Elkarte
herri-onurakoa dela aintzatesten duena.



HARPIDETZA-ORRIA

Urteko kuota: Hamabi ale urtean: 36 euro. TLF.: 94 475 28 83

KUATERNARIOAREN AURREKO ALDIA

KANBRIARRAURRREA (4.500 Ma-544 Ma)

HASIERAKO BEROA

Lehenengo zapiehun milioi urteetan -duela 4.500 milioi urte sortu zenetik duela 3.800 urte- Lurraren azala berotzen eta energia irakiten egon zen.

Poliki-poliki, magma hoztu ahala, mineral batzuk kristalizatu joan ziren, eta litosfera sortu zen, gainazal mehe eta solido bat, plakatan zartatua eta hautsia. Gainazal horrek estaltzen du planeta harrezkero. Hasierako garai hartatik ez da gelditzen ia batere arrokarik. Izan ere, lehenengo plaka mehe

Eta hauskor haiek, geruza likido mugikor batean igeri zebiltzanek, desegin eta hondora joaten ziren, behin eta berriro, sortu eta handik laster. Hondoratzean, presioa eta tenperaturak igotzeak urtu egiten zituen arroak, eta mineralak masa igneo bihurtzen ziren berriro; era berean, beste toki batzuetan magma igo eta solidotu egiten zen bitartean. Lurrazalaren eraketa eta desegitea egun. Lurrean gertatzen ari denean antzekoa zen, beraz; baina askoz ere azkarragoa eta bortitzagoa.

Izen mitikoko lehen eon hartan, Hadearrean alegia, klimak beldurgarria izan behar zuen (inork ikusi bazuen...). Planeta bizkorrago biratzen zen: egunak laburragoa ziren. Gainazala erdi solidoa erdi likatsua zen, batean burbuilaka bestean gori-gori, eta Lurraren barrutik substantzia lurrunkorrak botatzen zituzten kraterrez eta sumendi-tximiniaz beterik zegoen. Gas horietako batzuk -hidrogenoa kasu- arinegiak ziren, eta Lurraz kanpoko espaziora joaten ziren, betiko; beste batzuk -amoniakoa esaterako- swakonposatu egiten ziren eguzki-erradiazioagatik. Grabitatearen ondorioz. Lurrean atxikita mantendu ziren gas astunagoen bidez joan zen sortzen atmosfera primitiboa, hau da, Lurraren gasezko bilgarria. Atmosfera hark zuen gaur egun goaren antz handirik: elektrizitatez kargatua, etengabeko ekaitzen menpe, izugarri hezea, zerua zikinekoea eta sumendiei zerien hodei sufretsuz eta meteoritoen etengabeko talkek eragindako hautsez ilundua. Atmosferaren beheko maile-



tan oso tenperatura altuak izaten ziren, berotegi-efektua sortzen zuten gasen ugaritasunagatik.

Meteoritoak

Atmosferako beroaren iturri nagusia lurzorua bera zen, gori-gori baitzegoen beti, meteorito handien eta txikien etengabeko bonbardaketagatik, besteak beste. Grabitatearen erakarpenak gero

eta material gehiago eransten zizkion lur-bolari, eta, hala, lehenetik ere bazten nebulosa baten gasak eta partikulak bilduz ari zen eratzen. Eguzkia eta gainerako planetak eratu ziren bezala. Lurraren gainazalarekin talka egitean, bolido haien energia zinetikoa bero bilakatzen zen. Inpaktu haietako batzuk ikaragarriak izan behar zuten. Ziurrenik, talka haietako batean banatuko zen Ilargia, eta hark ere meteoritoen eraso bortitza jasaten jarraituko zuen. Hala, meteoritoek krater handiak sortuko zituzten Ilargiaren gainazalean, eta haiek desagerrazteko atmosferarik eta higadurarik ez duenez, oraindik ere ikus daitezke kraterak.

Erradioaktibitatea

Lurraren azalera iristen beste energia-fluxu handia planetaren barrutik zetorren, elementu kimiko erradioaktibo jakin batzuen (potasio-40, iodo-129, torio-232, uranio-235 eta abar, zeinak oso ugariak baitira oraindik magman) desintegrazio nuklearretik sortutako berotik. Gaur egun, oso apala da planetaren barrutik datorreen bero-fluxu globala (soilik 0,06 W/m², Eguzkitik datoren 240 W/m²-ren aldean). Hasierako garaietan, ordea, mantua oso erradioaktiboa zenez, bero-fluxua ikaragarria zen.

Eguzkia

Eguzkiak ere berotzen zuen Lurraren azala, baina eguzki-erradiazioaren intentsitatea gaur egungoa baino askoz txikiagoa zen orduan. Izan ere, Eguzkia haurtzaroan zegoen izarra zen artean, helio gutxi

zeukan eta, ondorioz, %20 edo 30 argi gutxiago egiten zuen. Beraz, gaur egun ez bezala, Eguzkiak bero gutxiago ematen zion Lurraren azalari, planetaren beraren barruko erradioaktibitateak edo meteoritoen inpaktuek baino.

Pixkanaka, barealdia etorri zen. Erradioaktibitateak eta magmaren berotasunak behera egiten zuten. Meteoritoen talkak ez ziren jadanik etengabeak; noizean behin izaten ziren. Hori bai, oso suntsitzaileak ziren oraindik, baina tarte handiagoarekin izaten behintzat. Hala, Lurraren azala hozten hasi zen toki guztietan.

Hoztean, ur likidoa ur lurrunduari lekua joan zen. Euri-erauntsi ez hain beroek litosferako sakanak bete zituzten poliki-poliki, eta lehen ozeanoak agertu ziren. Noizean behin, meteoritoen inpaktuen beroak itsasoa irakinarazten zuen, eta, ondorioz, lehortu egiten zen leku batzuetan, baina gero eta gutxiago gertatzen zen hori. Atmosferan lurrun gutxiago zegoenean -berotegi-gas indartsua da lurruna-, airearen tenperatura jaitsi egiten zen.

Planetako ur-masa gehiena egotera likidoan eta ozeano-arro iraunkorragoetan bilduta zegoelarik, planetak beste buruhaste bat bilatu zuen: bizia. Orain dela 3.800 milioi urte inguru, Arkear eonaren hasieran edo are lehenago, lehenengo bakterioak sortu ziren jatorrizko ozeanoetan.

Biziaren hasiera

Esan liteke Arkearreko atmosferak ezaugarri nagusi bat zuela: aireak ez zuen ia oxigeno-aztarnarik.

Duela 2.500 milioi urte arte iraun zuen eon horretan, sumendiek egozten zuten edo ur-lurrunaren disoziazioetik goi-atmosferan sortzen zen oxigeno apurra gas erreduktore batzuek (karbono monoxidoa, hidrogenoa eta metanoa) kontsumitzen zuten, eta oxidazio-erreakzio horietatik karbono dioxidoa eta ura sortzen ziren.

Bestalde, arroka kontinentalek, jatorrian, burdina zuten era erreduzituan, hau da, oxido ferroso gisa. Hala, oxigeno gehiago xur-



gatzen zuten atmosferatik, eta, oxidazio-erreakzio bidez, oxido ferriko bihurtzen zuten atmosferatik, eta, oxidazio-erreakzio bidez, oxido ferriko bihurtzen zuten.

Alegia, gaur egun eguzki-sistemako beste planetetan gertatzen den bezala, Lurreko atmosferak ez zuen oxigenorik izan bere historiaren lehenengo erdia pasatu arte. Askoz lehenago ee izan zen bizia, baina oxigenoa geroago sortu zen.

Fotosintesiaren baliatzen ziren organismoak agertzearekin eta garatzearekin batera aldatu ziren gauzak. Izaki bizidun berri horiek aireko oreka geokimikoa aldatu zuten, zeinak ordura arte kontzentrazio oso baxuan mantentzen baitzuten atmosferako oxigenoa.

Gaur egun, atmosferako gaseen % 21 oxigenoa da, eta Lurra da atmosfera oxigenatua daukan planeta bakarra eguzki-sisteman. Ikus dezagun xehetasun gehiagorekin prozesu horren bilakaera.

Zianobakterioak

Duela 3.500 eta 2.700 milioi urte bitartean, gutxi gorabehera, zianobakteriak agertu ziren kontinente primitiboaren kostaldeetako uretan. Zianobakterioak klorofila eta pigmentu fotosintetikoak dituzten bakterioak dira, eta, horien bidez, eguzki-argiaren energia jaso eta azukreak sintetizatzen dituzte. Zelulabakarrak edo haritsuak izan daitezke, eta 0,5 mm arteko luzera izan dezakete. Itsas planktonaren osagai oso garrantzitsua dira. Gaur egun ere, itsaso epel eta tropikaletan, zianobakterio zelulabakarrak -txiki-txikiak baina oso ugariak dira; 100 milioitik gora bizi dira litro bat uretan- dia materia organikoaren produkzio garbiaren sortzaile nagusiak. Ur txikiko kosta lohitsueta sinbiosian bizi dira beste mikroorganismo batzuekin, eta, haiekin batera, masa trinko eta goroldiotsuak eta estromatolito izeneko kare-estalkiak -zentimetro gutxi batzuetako lodierakoak- eratzen dituzte. Oraindik ere, munduko zenbait lekutan mantentzen dira Arkearreko eskrezi harritsu fosil horiek, garai hartan zianobakterioek izandako jardueraren agergarri; eta oraindik ere sortzen dira Australiako, Bahametako, Mexikoko eta beste eremu batzuetan.

Zianobakterioak (kloroplastoen eta landare-zelulen aurrekoak) bakterio fotosintetikoak ziren -eta hala dira oraindik ere-, eta karbono dioxidoaren eta uraren bidez, karbohidratoak eta oxigenos ekoitzen dituzte, eguzki-argia energia gisa erabiliz.

Lurraren historian zehar, zianobakterioak izan dira oxigenoa



sortzeko organismo nagusiak. Giro anoxiko-etan -oxigenorik gabe- bizi daitezke, baina oxigenoa ez da pozoia haientzat, beste bakterio ugarirentzat bezala; gustatu egiten zaie. Horregatik ugaltu ziren eurek sortutako ingurune oxigenatuan.

Arkearraren amaiera arte, bakterio-mota berri hori gutxiengoan egon zen beste mikroorganismo zaharrago batzuen aldean, zeinek beste erreakzio biokimiko batzuk erabiltzen baitzituzten bizi-energia sortzeko. Ziur aski, oraindik bakanak ziren zianobakterio horiek fotosintesian sortutako ia karbono organiko guztia bakterio horiek arnasketan eta deskonposizioan oxidatzen zen. Hala, karbonoa atmosferara itzultzen zen karbono dioxido gisa, eta oxigenoa fotosintesiaren kontrako prozesu kimiko baten bidez kontsumitzen zen. Prozesu hori ere era sinplifikatuan idatz daiteke:

$\text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{energia}$.

Fotosintesi bidez sortutako ia oxigeno dena berehala desagertzen zen; ez zen airean gertatzen.

Baina ez guztia. Beti gertatu den bezala, itsasoko materia organikoaren milaren bat, hitzean, ozeanoen hondoko sedimentuetan metatzen zen, eta lurperatuta geratzen zen, oxidatzeko aukerarik gabe. Horregatik, arnasketa/dskonposizio erreakzioa -airera CO_2 -a itzuli eta ekoiztutako oxigenoa kontsumitzen duena- ez zen, eta ez da oraindik ere, guztiz osoa.

Mineralen oxidazioa

Zianobakterioen lehen ehunka milioi urteetan, sortutako karbono organikoaren eta kontsumitutakoaren arteko aldea oso txikia zen, eta atmosferako oxigeno-kantitatea ez zeen handitzen. Behar bada, materia organikoaren arnasketaz eta deskonposizioaz gainera -ia oxigeno guztia kontsumitzen zuen horrek-, izango zen atmosferako oxigenoa harrapatzen zuen beste prozesu bat ere: mineral batzuen oxidazioa. Lurraren azaleko arroak artean oso aberatsak ziren burdin erreduzituan, eta burdina horrek, oxigeno egarri, aietik hartzen zuen oxigenoa, sortzen zen orduko.

Halaber, baliteke nahiko oxigeno ez izatea, ozono-geruza estra-



Estomatolitoak Australiako kotaldean.

tosferikoa sortu eta erradiazio ultramoreek sortutako disoziazioetik babesteko.

Oxigenoaren ugaritzea

Gauzak aladatu egin ziren Arkearraren amaieran eta Proterozoikoaren hasieran (orain dela 2.500-2.300 milioi urte gutxi gorabehera). Ekoizpen fotosintetikoa nagusitzen hasi zen, eta materia organikoaren oxidazioan eta mineral ferrosen oxidazioan galtzen zenari aurrera hartzen. Iraupen-atalase bat igarotakoan, oso azkar egin zuen gora aireko oxigenoaren kontzentrazioak, eta, horrekin batera, zianobakterio aerobikoak esponentzialki biderkatu ziren eta itsaso guztietan ugaltu. Hala, oxigenoak gaur egun atmosferan daukan maila (airea osatzen duten gasen % 21) iritsi zuen ia, nahiko denbora laburrean.

Baina guztiak ez datoz bat horretan. Batzuen iritziz, oxigenoaren metatze-prozesua mantsagoa izan zen, eta orain dela 600 bat milioi urte arte, hau da, Kantabriaurrearen azkenera, arte, ez zen iritsi egungo mailara. Izan ere, garai hartan agertu ziren izaki zelularki konplexuagoak, zeinek oxigeno gehiago behar baitzuten, eta baliteke orduko oxigeno-bolumen egokiaz baliatzea garatu izateko.

Atmosferako oxigenazioaren maila garrantzitsua izatera iritsi zeneko periodoa zeinahi ere den (2.000 milioi urte edo 600 milioi urte), Berner-en azterketen arabera, badirudi Fanerozoikoan -azken 500 milioi urteetan- atmosferako oxigeno-edukia % 15 eta % 35 artekoa izan dela. Berner-ek dioenez, atmosferaren konposizioan. Oxigenoaren maila % 35eko maximora iritsi zen Karboniferoaren amaieran eta Permiarraren hasieran (duela 300 milioi urte inguru), eta % 15eraino jaitsi zen Permiarraren amaieratik Triasikorako trantsizioan (duela 250 milioi urte inguru). Itxura denez, kontinenteetako zurezko landare baskularren garapen handiaren ondorioz, materia organiko ugari lurperatzen zen etengabe, eta horregatik gertatu zen oxigeno-kontzentrazioaren iguera handi hori Karboniferoaren amaieran. Hala, fotosintesi bidez sortutako oxigenoa ez zen desagertzen materia

organikoaren oxidazio bidez, oxigeno horren parte handi bat istinga eta paduretan lurperatuta geratzen baitez. Itsasoan materia organikoa lurperatzeak ere efektu hori eragiten zuen. Kasu horretan, pentsatzen da sumendien erupzioek CO_2 -aren horniketa egin zutela etengabe, CO_2 ez agortzeko eta, hala, oxigeno fotosintetikoa sortu ahal izateko. Permiarraren amaieran, ordea, O_2 -aren kontzentrazioa jaitsi egin zen, agian, atmosfera hoztu egin zelako eta kiilma lehorragoa bihurtu zelako eta horrek landareei eta fotosintesiari mesederik egiten ez zuelako.

Denbora gutxiagoko eskalan, %21 inguruko maila erregulatua eta mantendu duten mekanismo konplexuak izan dira ziurrenik. Oreka hausten duen prozesu bat agertzen denean, beste prozesu batek berrezartzen du oreka hori. Adibidez, fotosintesia areagotzearen eraginez, atmosferan oxigeno gehiago badago, hauek bat gerta daiteke: arroken oxidazioa ere areagotzea, eta, ondorioz, oxigenoa berriro galtzea; oxigeno gehiago izanda, mikroorganismo heterotrofoak ugaltzea lurrean; horiek materia organiko lurperatua jaten eta oxidatzen dutenez, aireko oxigenoa gutxitu egiten da; airean oxigeno gehiago izanik, sute handiak gertatzeko probabilitatea handitzea (orain dela 400 bat milioi urtetik aurrera, landaretzak kontinente handiak okupatzen dituenetik, gertatu izan direnak bezalakoak), eta, orduan, errekuntzak berriz ere oxigenoa gutxitzen duenez, oreka berrezartzea. Berrekatze-prozesu horiek eta horien aurkako beste batzuk gertatuko lirateke, baldin eta oxigenoa gutxituko balitz gehitu beharrean.

Ozonoa

Atmosferan nahiko oxigeno izatera iritsi zenean, eguzki-erradiazioaren laguntzaz, ozonoa sortuz joan zen, molekula normal biatomiko baten eta oxigeno-atomo aske baten konbinazioetik abiatuta.



B motako eguzki-erradiazio ultramoreak -hilgarria, indartsua bada- xurgatzeko duen gaitasunari esker, ozeanoen eta kontinenteen gainazaleko bizia errazago egin zuen ozonoak. Izan ere, lehenago, geruza babesgarri estalita ez zeuden organismo biziek beren burua babestu behar izaten zuten, argia oso bizia zenean, uretan murgilduz, itzala bilatuz edo lurpean sartuta.

Berotegi-gasak gutxitzea

Azkear eonean eta Proterozoikoaren hasieran, klima hoztuz joan zen, eta kausa-efektuzko atzerailadura-prozesu baten ondorioz, berotegi-gas nagusiak (lurruna, karbono dioxidoa eta metanoa) gutxituz joan ziren.

Hasieran, Hadearreko jatorri meteoritiko eta erradiaktiboko beroa gutxitu, eta Lurra hoztean, airean gaitasun higrometrikoa murriztu egin zen. Airean hotzagoa zenez, lurruna kondentsatu eta erori egiten zen, eta, finean, atmosferan zuen kontzentrazioa absolutua murrizten.

Zianobakterioak eta itsas fitoplanktona ugaritzen, karbono dioxidoa fotosintesi bidez xurgatzen zen, eta, hala, materia organiko planktoniko moduan finkatu zen karbonoa. Haren zati bat hondoratu, eta jalkin moduan lurperatuta geratzen zen; ondorioz, aireko karbono dioxidoa ere murriztu egin zen.

Eta, bukatzeko, atmosferan oxigenoa metatu ahala, hirugarren berotegi-gas garrantzitsua ere -metanoa- gutxitu egin zen, oxigenoak suntsitu egiten baitu karbono dioxidoaren eta uraren bidez.

Ikertzaile batzuek uste dute Arkearreko atmosfera nitrogenoz eta metanoz osatuta zegoela, nagusiki, Saturnoren ilargi handienaren -Titanen- atmosferan gertatzen den bezala. Gaur egun, metanoak hamar urte bakarrik irausten du atmosferan, batez beste, oxidatu egiten delako.

Baina oxigenoa airean metatu aurretik, metano-molekulek luza-roan irausten zuten atmosferan -milaka urte-, eta horregatik zen metanoaren kontzentrazioa hain handia. Metano hura Lurraren barrutik zetorren, zuzenean, sumendien tximinen bidez, edo, bestela, arkeen erreinuko bakterio metanogenikoetatik, zeinak atmosfera hartako oxigenorik gabeko baldintzetan bizi baitziren. Egun, bakterio metanogenikoak toki anoxikoetan gordeta bizi dira (bobidoen hesteetan eta urperatutako alorren lokatzen, adibidez).

Baina, orduan, askoz ugariagoak izango ziren ziur aski, ez baitzegoen oxigenorik airean. Bakterio metanogeniko horiek, karbohidratoak hartzituz, metanoa ekoizten dute eta ekoizten zuten. Gainera, atmosfera primitiboan, hidrogeno gehiago zegoenean, bakterio batzuek karbono dioxidoarekin konbina zezaketan elementu hori, eta horrela ere ekoizten zuten metanoa.

Baliteke metano horren parte bat arkeek beren kontsumitzea. Beste zati bat sedimentuetan lurperatua gelditzen zen, metano hidrato izoztu gisa, eta,

azkenik, hirugarren zati garrantzitsua bat atmosferara joaten zen. Ondoren, duela 2.500 milioi urte inguru, atmosferan oxigenoa metatzean, metanoa oxidatuz eta haren kontzentrazioa murriztuz joan zen. Azken finean, biziak, oxigenoa sortzean, planeta hoztea eragin zuen.

Lurra izoztu egin ote zen?

Arkear eonean, atmosferako beheko mailak berotzen zituen berotegi-gasen kontzentrazio hndiak izotu gabe atxiki zuen Lurra, nahiz eta Eguzkiaren orduko argitasuna gaurkoa baino dezente txikiagoa zen. Baina berotegi-gasak pixkanaka gutxitzearekin batera, glaziazioak izateko aukera agertu zen proterozoikoan.

Glaziazio huroniarra

Antzinako kontinenteen izandako glaziazioen lehen ebidentziak huroniar periodokoak dira, Arkearretik Proterozoikorako trantsiziokoak (duela 2.700 eta 2.300 milioi urte bitartean gutxi gorabehera).

Zenbaiten iritz, glaziazio hura -edo haiek, antza denez hiru fase oso hotz izan baitziren-ikaragarria izan zen. Lurraren zati handi bati eragin zion, eta, durudienez, zianobakterioek sortutako oxigenoak metanoaren gainean duen harrapari-efektua izan zen kausa (metano-kontzentrazio handia zela eta, ordura arteko berotegi-gas nagusia izango zen). Kasting-en arabera, posible da duela 2.300 milioi urte atmosferako metano-kontzentrazioa gaur egungoa baino mila aldiz handiagoa izatea.

Glaziazio huroniararren zenbait aztama geologiko daude, bereziki Kanadako Huron aintziraren eskualdeko arroka-estratuetan eta Hegoafrikan. Garai hartako tillitak ere aurkitu dira. Hainbat tamainatako materialak biltzen dituzten arroka sedimentarioak dira tillitak, eta antzinako glaziarren morrenen zementaziotik datoz. Halaber, gainazabal ildaskatuak agertu estratu geologiko huroniarretan, gainean mugitzen zen izotz-masa izugarriaren urradurak eragindakoak, inondik ere.

Glaziazio huroniarren ondoren, klima oso beroa bihurtu zen berriro, baina oraindik ere ez da aldaketa horren azalpenik eman ahal izan. Kanadako estratu glaziarren gainean, giro tropikaletan



sortzen diren zenbait arroka-mota agertu dira (adibidez, kaolini-ta). Glaziazio haren ondoren, ez da aurkitu glaziazio gehiagoren aztarnarik ia 1.500 milioi urteko tarte luzean (duela 2.300 milioi urtetik duela 750 milioi urtera arte).

Glaziazio neoproterozoikoak

Proterozoikoaren amaieran (Neoproterozoikoa), duela 750 eta 580 milioi urte bitartean datatutako arroketan, beste glaziazio batzuen aztarnak aurkitu dira. Ez ziren glaziazio arruntak izan, baizik eta inoiz izan diren handienak, seguru asko. Gainera, badirudi glaziazio bat baino gehiago izan zirela, milioika urtekoa bakoitza. Badirudi hiru gertakari glaziar garrantzitsu izan zirela: Sturtiarra (duela 710 miiioi urte inguru), Marinoarra (duela 635 milioi urte inguru) eta Varangerra (duela 600 milioi urte inguru).

Froga geologiko batzuen arabera, glaziazio haiek kontinente guztietan gertatu ziren, eta izotza tropikoetaraino heldu zen. Hala ere, oraindik ez dago garbiitsasoaren gainazala erabat edo ia erabat izoztu ote zen.

Neoproterozoikoko glaziazio horietan, bizia ia ezi-nezkoa bihurtu zen planetan. Garai haietan tropikoetan zeuden zenbait lekutako serie sedimentarioetan hain fase hotzeko estratuak ageri dira, ezen itsasoko jarduera biologikoa eten egin zela pentsatzen baita.

Analisien arabera, karbonato ez-organikoen estratu horietako karbonoa oso pobrea da karbono-13 isotopotan; horrek adierazten du itsasoan ez dagoela jarduera biologikorik, edo jarduera oso txikia dela. Ozeanoetako mikroorganismo fotosintetikoek nahiago dute karbono dioxidoa karbono-12aren bidez xurgatu karbono-13aren bidez baino; horrenbestez, bizia ugaria denean, mikroorganismo horiek eragiten dute sobrayzen den karbono-13aren kontzentrazio isotopikoa handia izatea uretan. Horren ondorioz, karbono-13aren kontzentra-

zioa igo egiten da karbonato ez-organikoetan ere, ozeanoan disolbatutako karbonotik sortzen baitira. Hori del aeta, glaziazio neoproterozoikoen azken faseetako sedimentu karbonatatuetao karbono-13aren kontzentrazio txikiak kontrakoa erakusten du: garai hartan, itsasoko jarduera fotosintetikoa oso txikia izan zela.

Garai hartako estratu geologikoetan ageri diren burdin mineralen egitura ugariak dira. Neoproterozoikoko glaziazioen beste aztarna bat. Banda-egituradun buztin burdintsuen eran agertzen dira egitura horiek, zeinetan silexezko geruza grisak eta burdin askoko beste material gorrixka batzuk gainjartzen baitira.

Honela azal daiteke burdinarik gabeko eta burdinadun sedimentuen txandaketzea: glaziazio-aldietan, ozeanoetako ur sakonak kilometro batzuetako lodierako izotz-geruza batez bereizita zeuden airetik. Ondorioz, ez ziren aireztatzen, eta ur haietan bizi ziren organismoen arnasketa biologikoak agortu egiten zuen uretan disolbatutako oxigeno guztia. Hala, itsas hondoko iturri termaletako burdina itsasoko uretan disolnatzen zen, oxidatu edo hauspeatu gabe. Horregatik dute kolore grisa glaziazioetan metatutako sedimentuek. Aitzitik, desglaziazioetan, gainazaleko izotza urtzeak ura aireztatzen uzten zuen berriro. Orduan, uretan kontzentrartuz joandako burdin disolbatua oxidatu egiten zen, eta buztin buztintsu gorritzko geruzatan hauspeatzen zen masiboki. Geruza haiek aurreko sedimentu grisén ondoan jartzen ziren.

Gaur egun Kalaharin ustiatzen diren manganeso dioxidozko metaketa handien antzekoak mberean sortu ziren ziurrenik; alegia, itsasoko uretan disolbatuta egondako manganeso ioien bat-bateko oxidazioaren eraginez.

Baina, oraindik ere, zalantza asko daude glaziazio erraldoi horiei buruz. Teoria muturrekoenak dio glaziazio globalak edo ia globalak izan zirela, eta Lurra “*elurrezko bola handi bat*” bihurtu zela. Teoria horren arabera, itsaso guztiak edo ia guztiak ia maila metroko lodiera izan zezakeen bankisa batez estalirik egon ziren.

Hala ere, oraindik ez da argitu nola iraun zuten hotz ikaragarria egin arren lehenago ozeanoetan agertutako animalia zelulaniztuek. Beharbada, ez zen izoztu ur guztia; behar bada soilik gainazaleko geruza mehe bat izoztu zen, eta horrek eguzki-argiari sartzen uzten zion, eta, beraz, bizi fotosintetikoak geruzaren azpian iraun egin zuen. Gainazaleko izitzak termikoki isolatuko zuen azpiko ura, eta egoera likidoan mantenduko zen beti, seku-



la izoztu gabe. Horrez gain, itsas hondoko jarduera hidrotermalak ere bere horretan jarraituko zuen, baita garai hotzenetan ere, eta ur sakonetako beroa atxikitzen lagunduko zuen.

Hain erradikala ez den beste teoria baten arabera, glaziazioak ez ziren izotz globalak, baizik eta izoztu gabeko ekuatorezerrrenda bat gertatzen zenbeti ozeanoetan, eta horixe izan zen animalia zelulaniztunen babeslekua garai gogorrenetan.

Metanoaren eta karbono dioxidoaren murrizketa

Teoria ugari daude Neoproterozoikoko glaziazio horien kausei buruz, aina klima-aldaketa sakon haien azalpenak nahiko ilunak dira oraindik ere.

Geologo gehienek iritziz, berotegi gasen -ta bereziki, oxigenoak suntsitutako metanoaren- bat-bateko murrizketak eragin zituen. Oxigeno hura planktonaren jarduera fotosintetikoaren gehikuntza handiaren eraginez sortuko zela pentsatzen da, itsas hondotako mantenugaiek (adibidez fosforoak) lagunduta. Izotz-urtze handiek sortutako olatuek eta itsaslasterrek itsas hondoak mugitzen zituzten, eta milioika urtean han behean metatutako mantenugaiek azaleko uretara eta ziklo fotosintetikora itzularazten zituzten.

Metatutako izotzak argia islatzen eta, ondorioz, Lurrak eguzki-energia gutxiago xurgatzean, indartu egin zuten hozte-prozesua, katastrofiko bihurtzeraino. Horrez gain, ez zegoen beroa atmosferaren behealdean atxikiko zuten berotegi-gasen kontzentrazio handirik, eta, duela 700 milioi urte inguru, Eguzkiaren argitasuna egunkoa baino ahulagoa zen 8% 6 txikiagoa gutxi gorabehera). Arrazoi horiek guztiak egon daitezke glaziazio handi horien atzean).

Oxidazio bidezko metanoen bat-bateko galeraz gain, karbono dioxidoaren galerak ere azaldu dezake gertatutakoa. Zergatik murriztu zen karbono dioxidoa? Periodo glaziar horren aurretik (orain dela 1.000 milioi urte inguru), superkontinente handi bat zegoela pentsatzen da, Rodinia deitu

zaiona. Rodinia plakatan zatitzen hasi zelarik, itsasoen maila igo zen eta urak hartutako kosta-eremuak ugaldtu ziren. Sakonera txiki-ko itsas eremu berri haiek ugar-riak ziren elikagaietan eta plankto-nean, eta, jarduera biologiko han-di haren ondorioz, atmosferako karbono dioxidoaren hustuleku gisa funtzionatu zuten.

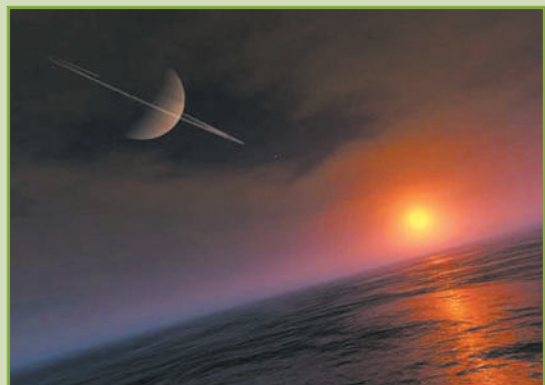
Jarduera tektoniko haren eragi-nez, mendikate berriak sortu ziren eta prezipitazio handiagoak izan ziren kontinenteetako ertzetan; horrek higadura handitzea eta sili-katoak meteorizatzea eragin zuen. Hain zuzen, prozesu kimiko hori izan zen atmosferako karbo-no dioxidoaren ziklo geologikoa murrizteko faaktore nagusietako bat. Hozte-prozesua hasi ondoren, ziklo hidrologikoa moteldu egin zen. Ondorioz, lurrunketa ere murriztu egin zen, eta atmosferako beste berotegi-gas garrantzitsu bat gutxitu zen: lurruna.

Lurraren ardatza zeharragoa?

Beste hipotesi ausartago baten ara-bera. Lurraren ardatzaren zeharta-suna asko aldatu zelako izoztu ziren eskualde tropikalak. Ardatzaren zehartasunaren aldaketa hark sartu-tako eguzki-erradiazioaren banaketa latitudinala aldatuko zuen, eta horiek izugarri jaitsaraziko zuen tropikoeta-ko beroa. Gaur egun, Lurraren erro-tazio-ardatzaren inklinazioa 23,5 gradukoa da; baina inoiz 54 gradutik gorakoa izan bada, txikiagoa izango zen ekuatoreko intsolazioa, poloeta-koa baino. Teoria horri jarraiki, konti-nenteen jitoaren mugimendu azka-rrek edo asteroide handi baten talkak eragin zezaketen aldaketa hura. Ondoren, Lurraren barruko magma-masen errotazio-inertziak ekarriko zuen Lurra egungoaren antzeko biratze-posiziora. Baina teoria horrek badu akats bat: poloak ere izoztuta egon ziren modu iraunkorrean, eta, ardatza okertu izan balitz, goi-latituteetako udako eguzki-erradiazio indartsuak polo-ak urtuko zituen.

Espazioko zikinkeria?

Bada teoria astronomiko orokorrago bat ere, Neoproterozoiko glaziazioei aplica dakiekena. Teoria horren arabera, denbora-eskala oso luzeetan, aldaketa handiak izan dira. Lurraren atmos-ferara iristen den eguzki-energian, Lurraren eta Eguzkiaren arte-an dagoen espezioaren gardentasunean izandako aldaketen ondorioz. Eguzki-sistemak galaxia-nukleoan inguruan egiten duen bidaian -250 milioi urte irauten du-, hauts kosmiko- z bete-tako aremu zikinak igarotzen ditu, eta horiek nolabaiteko opaku-tasuna sortzen dute Eguzkiaren eta Lurraren arteko argi -trans-misioan. Kalkuluen arabera, Lurrera isisten den eguzki-fluxua ia



10 W/m2 murriztu daiteke 200.000 urteko epealdietan, eta baliteke horrek eragin izana iraganeko gla-ziazio ikaragarri horiek.

Baliteke, halaber, bidaia luze horre-tan galaxiatik eguzki-sistemara sar-tzen diren izpi kosmikoak aldatuz joatea, eta horrek ere eragina izatea Lurraren hodei-estailan.

Nola amaitu ziren?

Nola amaitu ote ziren Neoprotero-zoikoko glaziazio ikaragarri haiek? Zail da jakiten. Baliteke uneren bate-an CO2-aren kontzentrazioa supitu-kieta ikusgarriro igo izana. Teoria baten arabera, sumendien jarduera ikaragarria hasi zen, bat-batean, kontinenteetan eta itsas hondoan. Ondorioz, CO2-aren mailak ikaraga-rrizko igoera izan zuen oso denbora laburrean, eta 120.000 ppm-ko (ppm: milioiko parte) kontzentrazioa iritsi zuen, hots, egungoa halako 350. Horrek halako berotegi-efektu handia sortu zuen, ezen itsasoaren gainazaleko izotza urtu baitzen. Aldi berean, CO2 horretatik zetozen kar-bonato-jalkitze ikaragarriak gertatu ziren itsasoaren hondoan. Hain zuzen, jakin horiek daude estratu glaziarren goiko geruzan, Bestalde, karbonatoen estratu sedi-mentario horien egitura eta formek adierazten dute olatu eta hai-zete handiko erregimen batean eratu zirela, eta olatu eta haize-te handi horiek, behar bada, urtutako eremuen eta oraindik izoz-tuta jarraitzen zutenen arteko kontraste termikoen ondorioz sor-tuko ziren.

Beste ikertzaile batzuetan aburuz, oster, bat-bateko gainbero-tze haren kasua ez zen izan sumendien CO2-a baizik metanoa. Ozeanoen kostaldeetako zorupea urtzean irten metanoa, proze-sua abiarazi zuen itsas transgresio baten ondoren. Horrenbes-tez, karbono-12aren ratio handia eta karbono-14aren jaitiera -sedimentuen datazio berri batzuen arabera, ez zen glaziazioan gertatu, baizik eta desglaziazioan sedimentatutako karbonoetan-metanoaren bat-bateko gehikuntzagatik gertatu zen, metanoak

ezaugarri isotopiko horiek baititu (kar-bono-13 gutxi) bere jatorri biologikoa-gatik.

Teoria horren arabera, baliteke kostal-deetako uraren tenperatura igotzeak itsas zorupeko izotz-kristaletan (klatra-toak) harrapatutako metano-poltsak ezegonkortu izana. Izan ere, presioaren eta tenperatura baxuen eraginez, itsas-peko lehenengo sedimentu-metroetako poroetan izoztutako ur-kristalen artean metanoa matatzen da. Halaber, metano hidratoak daude permafrost-ean edo goi-latituteetako eskualde kontinenta-leko lurzoru izoztuetan, baina kantitate txikiagoan. Itsas hondora eroriz doan materia organikoaren bakterio-deskon-posizio metanogenikotik sorten da metanoa. Bestalde, metano gehiago sortzen da produktibitate biologiko handiko kostaldeko itsasoe-tako hondo anoxikoetan, gaizki aireztatua daudenean. Normalean, era horretan sortutako gas-burbuiklak igo eta atmosferara joaten dira; baina, uraren tenperatura oso baxua denean (1 edo 2 °C), metanoaren zati bat ur iziztutan gera dai-



teke harrapatuta. Aldi berean, metano horrek itsas zorupeko espazio porotsuak betetzen ditu. Hala, uraren tenperatura igo-tzean, metatutako metano hura aske geratuko zen, eta, meta-noa berotegi-gas indartsua izanik, berotzea areagotuko zuen, klima-baldintza katastrofikoak sortzeraino.

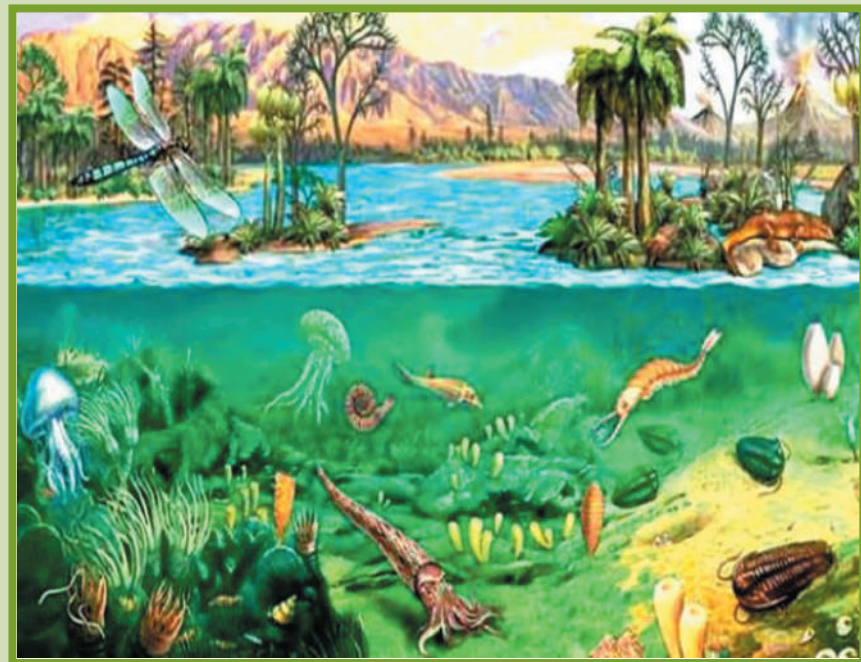
ERA PRIMARIA-PALEOZOIKOA (544 Ma-245 Ma)

"KANBRIARREKO LEHERKETA"

O rain dela 540 milioi urte inguru, ozeano-etako biziaren eboluzioa azkartu egin zen. Espezie-kopurua biderkatu egin zen, ia bat-batean, eta itsasoko animalien tamainak eta formak aldatu egin ziren.

Ordura arteko gorputz tziki eta biguneko ani-malien gorpuak ez bezala -bakterioek bere-hala deskonposatzen zituzten, eta aztamarik utzi gabe desagertzen ziren-, espezie berriek karedun oskol eta eskeleto gogorrak garatu zituzten. Horri esker, leku askotan gordetzen dira animalia haien fosilak, arroka sedimen-tarioen estratuen barruan sartuta. Fosil horien ugaritasunari esker, datu garrantzitsu asko bildu dira, orduz geroztik geologian eta kliman izan diren aldaketei buruz. Hori dela eta, orduan hasitako azken eonari Fane-rozoiko deitzen zaio (grekozko *phaneros* "agerikoa" eta zoe "*bizia*").

Ozeanoetako bizi-leherketaren edo "*Kan-tabriarreko leherketaren*" arrazoiak oso ilunak dira oraindik (fosil ugari-ko aztamategi bakan batzuetan daude leherketa haren aztarnak; adibidez, Kanadako Burgess Shale-n). Paleontologo batzuek uste dute itsasoen eta kontinenteen geografia-aldaketa handi bezain azkarrek eragin zutela planetako biziaren bilakae-raren bizkortze hura, eta hark aldaketa handiak eragin zituela itsaslasterrean eta uraren tenperaturan eta gaiztasunean. Itsasoko ingurumen-aldaketez gain -agian. mantenu-gaiak ugari-tu zirelako upwelling-aren gehikuntzaren eraginez-, beharbada, gen garrantzitsu bat -"hox" genbat- mutatu zen izaki zelulaniztun primitibo batean, eta horrek aldaketa morfologiko handi bat abia-razi zuen animalia-bizian.



Bestalde, beste zenbaiten arabera, baliteke itsasoko uraren magnesio-kaltzio ratioa aldatzea, batetik higadura-eritmoetan eragina duten aldaketa tektonikoen eraginez eta, bestetik, disol-batutako elementu kimikoak dituzten lur barruko termalak irtete-aren eraginez. Teoria horren arabera, Kantabriarrean hasieran, ratio hori jaitxi egin zen, eta itsasoko urak kaltzio-kontzentrazio nahikoa lortu zuen karedun animalien eklosioa ahalbidetzeko.

Beste ikerlari batzuen ustez, izaki bizidun handiagoak eta zelu-larki konplexuagoak agertu ziren, behar adinako oxigeno-bolu-mena -gaur egungo atmosferaren antzekoa- erabil zezaketelako. Teoria horren arabera, oxigenoaren gehikuntza hura Kantabriarrearen amaieran gertatu zen (Ediacaran periodoan),

agian, lurperatzen zen karbono organiko kantitatea handitzeagatik. Baliteke lurzoru buztintsuagoei gehikuntza hura bultzatzea, karbonoa atxikitzen baitute. Buztinak ugaritu eta hondarrak eta bestelako elementu lodiagoak gutxitzean, uste da lurreko onddoak agertu zirela, eta horrekin batea, onddoen jarduera deskonposatzailea. Hala, pentsatzen da biziak aireko oxigenoaren gehikuntza bultzatu zuela berriz ere.

KANBRIARREKO ETA ORDOVIZIARREKO KLIMA

Duela 500 milioi urte inguru, Paleozoikoaren hasieran, ugaineratutako ia lur guztiak hemisferio australean zeuden. Ipar hemisferio ia osoa, berriz, ozeanoa zen, gaur egun ez bezala (30° N-tik aurrera, urak estaltzen zuen dena).

Urgaineratutako kontinente guztietatik Gondwana superkontinentea zen garrantzitsuen, beste guztiak baino askoz handiagoa baitzen: ekuatoretik Hego poloraino hedatzen zen. Hala, lurmasa bakarrean biltzen zituen Hego Amerikaren, Afrikaren -Europako hegoaldeko zati batzuk barne, beteak beste, Iberiar penintsula-, Arabiaren, Antartikaren, Australiaren eta Indiaren kratoiak. Bideanabar, Indiako antzinako gondoen tributik dator Gondwana izena, eta "gondoen herria" esan nahi du, nahiz eta garai hartan, noski, oraindik existitzen ez ziren. Izenak jartzean, geologoei bazterrak nahasteko joera dute.

Gainerako kontinenteak askoz ere txikiagoak ziren. Horietatik Laurentia zen handiena, eta Kanadako kratoiar zegokion, batez ere. Quebec-eko Saint Lawrence ibaiaren iparraldeko Laurenditar mendietatik dator izena. Kontinente hori eta

Siberiako kontinentea tropikoaren parean zeuden orduan. Hegoalderago, berriz, Baltika zegoen, eta finoeskandinaviar kratoiak osatzen zuen.

Paleozoikoaren lehen parteko -lehen ehun milioi urteak: Kantabriarra eta ia Ordoviziar osoa- klimari buruz ezin dugu askorik esan. Artean, planetako landare- eta animaliak-bizia ez zegoen aski garatua, erregistro fosil kontinentalean nahikoa informazio utzi ahal izateko. Badakigu urgaineratutako lurretan zianobakterioak eta algak bizi zirela, baina oraindik ez zegoen landararik. Dena den, ia ziur esan daiteke, ozeanoak gaur egun baino zabalagoak izanik, klima orokorra ozeanikoagoa eta epe-lagoa izango zela eta aldaketa gutxiago izango zirela urtaroen arabera. Halaber, kontinenteen barruraino sartzen ziren itsaso zabalak zeuden, eta horrek animalien dibertsitatearen garapena azkartzen lagundu zuen. Izan ere, kontinente horietako sakonera gutxiko urak aberatsak ziren elikagaitan, eta beraz, baldintza biotopiko ezin hobeak sortzen zituzten bizi ugaltzeko.

ORDOVIZIARREKO GLAZIAZIOA

Baina Ordoviziarren amaiera eta Siluriarraren hasiera aldera -duela 450 eta 430 milioi urte bitartean gutxi gorabehera-, glaziazio handi bat izan zen Gondwanaren latitude australean, eta eragin handia izan zuen ozeanoetako animalia-dibertsitatean (ekinodermoak, tribolitak, nautiloideoak...). Garai horretan gertatu zen Fanerozoikoaren lehen suntsipen biologiko handia.

Saharako basamortuaren azalean Ordoviziarreko glaziazio horren aztarnak ikusten dira. Horien arabera, garai hartan, 8 milioi km²-tik gorako izotz-estalki lodi baten azpian egon zen basamortua. Hala, Hoggar mendigunetik Mauritaniako kostalde atlantikoraino lur ordoviziarretan, glaziarrek lur harkaiztsuak higatzean egiten dituzten ildo eta uradura luzeen antzeko aztarnak daude oraindik ere. Halaber, Hoggar mendigunearen oinean, U formako ohiko haran glaziarrek daude, antzinako glaziarren higaduraren ondorioz sortutako erliebeetan ohikoak diren arroka leunduekin eta drumlin-ekin (forma luzeko muinoak).

Badirudi plaka tektonikoen mugimenduaren eraginez, gaur egungo Amazonia eta Afrikako iparraldeko -Gondwanaren barruan zeuden, elkarren ondoan- Hego polo geografikoaren inguruan gertatu zirela, ehunka milioi urtez, izotza metatzeko klima-baldintza



egokietan.

Intsolazioa oso txikia izateaz gain itsasoa gertu zegoenez, hezetasun ozeaniko handia heltzen zen, eta, ondorioz, elur-prezipitazio handiak izaten ziren neguan..

Ordoviziarreko glaziazio haren paradoxa handiena da garai hartako CO₂-aren kontzentrazioa oraingoa baino askoz handiagoa zela (arroka batzuetako karbono-edukiaren azterketatik ondorioztatutakoaren arabera, 16 aldiz handiagoa). Beraz, badirudi faktore geografikoek airearen konposizio kimikoak baino garrantzi handiagoa izan zutela glaziazio haren sorreran.

SILURIARRA, DEVONIARRA ETA KARBONIFEROA: KLIMA BERO ETA HEZEA

Orain dela 450 milioi urte, Ordoviziarrean gertatutako glaziazioaren ondoren, tenperaturak igo egin ziren, berriz ere, eta bero mantendu ziren Siluriarrean, Devoniarrean eta ia Karbonifero osoan, orain dela 300 milioi urte ingurura arte. Beroa, hezetasuna eta CO₂-aren kontzentrazio handiko atmosfera lagungarri gertatu ziren, landareek eboluziona zezaten eta kontinenteak koloniza zituzten.

Garai bero luze haren hasieran, Siluriarraren erdi aldera -orain dela 420 milioi urte inguru- funtsezko fenomeno biologiko bat gertatu zen: landare baskularrak agertu ziren, hau da, substantzia organiko berri batekin (lignina) egindako zurtoin zurrunkak eta ehun eroaleak zituzten landareak. Substantzia horrek behar zuten euskarria ematen zieten bertikalki hazteko. Lignina landare-zuntzaren funtsezko zatia da, eta nahiko gogorra da degradazioaren eta oxidazioaren aurrean. Lignina agertu zenetik hura deskonposatzeko gai ziren onddoak eboluzionatu arte denbora asko pasatu zenez, substantzia horren karbono-kantitate handiak beste sedimentu batzuetan lurperatuta geratu ziren.

Devoniar osoan eta Behe Karboniferoan -duela 400 eta 300 milioi urte bitartean gutxi gorabehera- landare baskularrak kontinente guztiak kolonizatzen jarraitu zuten, eta landare-espezie berri ugari sortu ziren.

Klima heze eta beroaren ondorioz, ziklo azkarreko zuhaitz handiko basoak agertu ziren. Zuhaitz haiek erori eta urak errean eraman zituenean, ligninaren karbono organikoaren kantitate



handiak geratu ziren padura eta zingiretako lurretan. Uretan ez zegoen behar adina oxigeno disolbatuta karbono hura gutia oxidatzeko, ezta nahiko bakterio aerobiko ere deskonposizio-lana egiteko. Hala, itsasetzeko istinga eta zingiretan eta barnealdeko hezegune zabaletan, materia organikoaren lurperatze-prozesua etengabea izan zen. Denboraren joanarekin, materia

organiko hura Karboniferoako arroka bereizgarriena bihurtzen zen: ikatza, zeinak periodoari izena ematen baitio.

KARBONIFEROAREN AMAIERAKO GLAZIAZIOA

Orain dela 300 milioi urte inguru, landareek xurgatutako eta atmosferako CO₂-tik etortitako karbono organiko kantitate ikaragarri handia sedimentuetan harrapatuta zegoenez, berotegi-gas hura oso maila baxura -gaurkoaren parekora- iritsi zen. Baliteke, aldi berean, oxigenoaren kontzentrazioak prozesu paralelo bat izatea, eta bere gehienezko mailara iristea: % 35.

Karboniferoaren amaieran eta Permiarraren hasieran, klima hoztu egin zen, eta beste periodo glaziar bat hasi zen. Gondwanaren latitude australean -gaur egun Hegoafrika den partean- izit-estalki handi bat egin zen, elkarren segidako zenbait fasetan hazi eta uzurtu zena. Arrazoi horregatik, itsasoa-aren naila jaitsi eta igo egin zenbait aldiz, eta itsas transgresio eta erregistro ikaragarriak izan ziren Paleozoikoaren amaierako gaia hartan guztian.

PERMO -TRIAS KATASTROFEA

Duela 250 milioi urte, Paleozoikotik Me-sozoiko-rako trantsizioan, planetak jasan duen hondamendi ekologikorik handienetakoa gertatu zen: Permo-trias katastrofea (horrela deitzen zaio, Permiarraren -Paleozoiko azken periodoaren- eta Triasikoaren -Mesozoiko lehen periodoaren- artean gertatu zelako). Milaka urte gutxi batzuetan, itsas espezieen %85 (adibidez, tri-

boliteak) eta lehorreko ornodunen % 70 desagertu ziren, baita ia intsektu guztiak ere.

Itsasoetako produktibitate biologikoaren kolapsoa eta kontinenteetako hondamen ekologikoa batera gertatu ziren.

Katastrofearen arrazoiei buruzko teoria asko daude, baina, batez er, bi hartzen dira kontuan: asteroide baten talka ets sumendiren erupzio masiboa. Horiekin batera, oxigenoaren murrizketaren teoria ere aipatu behar da.

Asteroidea

Hodamena oso azkar gertatu zela uste dutenek defendatzen dute bolido estralurtar baten erorketaren teoria. Ehunka itsas espezie -arrainak eta foraminiferoak barne- heltzen diren muga estratigrafikoa xeheki aztertutik ondoren, garai horretako zenbait espezialistek ondorioztatu dute bakar batean gertatu zela guztia. Gainera, fulereno molekulen -dozenaka edo ehunka karbono-atomoz osatutako jatorri estralurtarreko molekula esferikoen- barruan aurkitutako helio-, neon- eta argon-aztarnek meteoritako gas horien laginetan aurkitutako konposizio isotopiko berdintsua dute. Antartikan aurkitutako zenbait meteorito-zatiren aurkikuntzak ere inpaktu horrekin lotzen dituzte. Bestalde, Australiaren kostaldeko plataforman, Bedout High-en, garai hartako egitura geologiko bat aurkitu dute berriki, eta asteroide handi baten erorketaren ondorioz irekitako krater batena izan daitekeela diote.

Siberiako sumendiak

Beste teoria baten arabera. Siberia izandako sumendi-erupzio masiboen eragindako bat-bateko klima-aldaketak ekarri zuen suntsipen biologikoa. Basalto-plataformaz osatutaako eremu zabalak garai horretakotzak jotzen dira. Uste dute lurrazaleko pitzaduretatik laba-kolada ikaragarriak eta zenbait gas magmatiko irten zirela eta haien atmosferaren konposizio kimikoari eragin ziotela.

Horrek mota askotako hondamendiak sor zitzaizkeen. Sufre- eta karbono-konposatuak atmosferako lurrunarekin konbinatuz gero, azido sulfurikozko eta karbonikozko euriak eragingo zituzten, zeinek itsasoko eta kontinenteetako landaretza pozoituko baitzuten. Bestalde, uste da sumendi-erupzioek aldaketa termiko bortitz eta jasangaitzat eragingo zituztela. Hau izan daiteke gertakari



segidetako bat: lehenik, klima hoztu zen, bat-abatean, sumendietako SO₂-ak ekarritako hautsak eta hodei sulfatuek sortutako iluntasunaren ondorioz. Ondoren, hauts-partikula haiek, sulfatoak eta gainarako aerosolak sedimentatu ondoren, atmosfera argitu egin zen, eta bat-bateko bero-tzea gertatu zen, CO₂ kantidadean eragindako berotegi-efektuaren ondorioz. Izan aere, sumendiek CO₂-a ere isirtzen zuten, eta horrek askoz denbora gehiago irautea airez. Siberian permafrost-eremu handiak urteak ere metanoa erantsiko zion atmosferari, eta horrek ere berotegi-efektua indartuko zuen.

Oxigenoa gutxitzea

Bukatzeke, beste batzuek uste dute suntsipena ez dela hain azkarra izan, eta atmosferako oxigenoaren kontzentrazioan izandako murrizketa handi batek eragin zuela. Lehenago azaldu bezala, Berner-ek dioenez, oxigenoaren konzentrazioa % 35etik % 15era murriztu zen Permiarraren hasieratik amaiera. Horrek asko mugatu zituen bizitzeko egokiak ziren eremuak, ehunka metro gutxi batzuetako altueratik gora oxigenoaren presio partziak txikiak ezinezkoa egiten baitzuten bizia espezie askorentzat.

Suntsipen masibo haren ondoren, ezegonkortasun biologiko handiko 3 edo 4 milioi urte igaro ziren, karbonoaren isotopo astunari -karbono-13ari- eragin zioten anomalia positibo eta negatiboak erakusten duten bezala. Agian, eremu tropikal batzuetan karbono organiko asko -karbono-13 gutxiagoa- lurperatuta egoteak sortzen zituen anomalia positibo horiek. Horrek ozeanoetako karbono-13 proportzioa handitzen zuen eta, bide batez, baita itsasoko karbonato ez-organikoen sedimentuetako karbono-13aren proportzioa ere. Anomalia negatiboak, berriz, gas metanoaren estrusioen ondorioz sor zitezkeen, gas metanoa karbono-13 gutxiagoa baita, edo, bestela, lurperatze organikoaren erritmo oso baxuko garaien ondorioz.



ERA SEKUNDARIOA -MESOZOIKOA- (544 Ma-245 Ma)

TRIASIKOA: IDORTASUNA ETA BEROA PANGEAN

Mesozoikoak duela 245 milioi urtetik duela 65 milioi urtera iraun zuen. Paleozoikoan ez bezala, Mesozoikoak iraun zuen denbora horretan ez da aurkitu inongo glaziazio garrantzitsuren aztarnarik. Inoiz uste izan da -neurritz gain bada ere- eskala globalean, klima nahiko unormea zela orduan, eta, ondorioz, flora eta fauna homogeneoagoak zirela Lurreko latitude guztietan. Gaur egun, aldiz, pentsatzen da, glaziaziorik izan ez arren, horrek ez duela esan nahi latitude polarretan neguak oso hotzak izaten jarraitu ez zutenik.

Triasikoan -duela 245 eta 208 milioi urte bitartean-, hau da, Mesozoikoaren lehen periodoan, kontinente bakar eta trinko bat zegoen (Pangea), ozeano bakar batez (Pantalasa) inguratua. Horrek klima idorra sortu zuen kontinentearen barruko eremu zabaletan, non itsasoaren urruntasunak muturreko idortasun-baldintzak eragiten baitzituen eta urtaroen arabeko aldaketa termikoak oso handiak baitziren. Mendikate handirik gabeko kontinentea zela uste da, erliebe lau eta higatua zuena; hori dela eta, ziurrenik ez zuen euri handirik egingo. Agian, aintzira isolatueta ura metatzen zuten arro endorreiko batzuek pixka bat arinduko zuten lehortea eta leunduko zituzten klima kontinentalaren muturreko tenperaturak. Hala eta guztiz ere, Pangeako klima simulatzen duten ereduak muturreko oszilazio termikoak agertzen dituzte kontinentearen hego-muturrean eta barnealdean. Uda oso beroak eta negu oso gogorrak izaten ziren, beraz.

Itsasotik gertuago zeuden Pangeako beste eremu tropikal eta ertain batzuek, berriz, montzoi-erako klima -udako euriteekin- izango zutela pentsatzen da. Udan, ozeanoaren eta Pangea zabalaren artean sortzen zen kontraste termikoak presio-gradiente bat eragingo zuen, eta hark itsasoko haize hezeak erakarriko zituen barnealdera. Baina erliebe garrantzitsurik ez egoteak indarra kentzen zion montzoiari, eta nekez sortzen zen hodeirik. Horregatik, badirudi ugariagoak izan zirela baamortu tropikalak Pangean, montzoi-landareekin okupatutako eremuak baino.

Triasikoan klima beroetan ohikoak diren arroka ebaporitiko asko zeuden. Ur gaziak itsas transgresioetan aldizka estaltzen zituen



eskualdeetan metatzen ziren arroka haiek. Hondartzeko barrak eratzean, arro haiek inkomunikatu gertatzen ziren ozeanotik, eta lehortu egiten ziren, behin eta berriz. Hala, ziklikoki, albuferen zolan gatz-sedimentu lodiak metatuz joan ziren.

Halaber klima bero eta idorrek hareharri eolikoen eta buztin gorrien seriesedimentarioak eratzea bultzatzen zuen. Batzuetan, igeltsuzko eta gatzeko horizonteekin txandakatuta ageri dira sedimentu haiek, Europan eta Ipar Amerikan. Landaretzarik ez zegoenez eta klimak aipatutako ezaugarriak izanik, arroka sedimentario haiek eskarlata kolore bizia hartu zuten, gainazaleko hematite-kontzentrazio handiaren eraginez.

Triasikoaren amaieran, orain dela 208 milioi urte, Pangea zartatzen hasi zen, Hego Amerika eta Afrika bananduko zituen haustura-lerrotik. Lerro hartatik ikaragarriko basalto-koladak ateratu ziren. Pentsatzen da orduan isuritako gasek aldaketa kimiko handiak eragin zituztela, berriz ere, atmosferaren konposizioan -SO₂-ak eragindako euri azidoak- eta kliman, eta horrek eragin handia izan zuela planetako biologian. Horrez gain, baliteke sumendiek isuritako CO₂-aren gehikuntzak eragindako bat-bateko fase beroa egotea hondamendiaren oinarrian. Handiko gertaera haiek planetako espezieen % 80ri eragin zioten, eta, seguru asko, baldintza hobeak jarri zituen dinosauroak -hurrengo 100 milioi urteetan Lurrean nagusiki izan zirenak- ager zitezen.

Beste ikertzaile batzuen arabera, itsasoan mailan izandako aldaketa ezkarra daude hondamendi biologiko haren jatorrian. Azkenik, bada asteroidearen baten talkaren susmoa aipatu duenik ere, planetaz kanpokoak izan daitezkeen iridio-kontzentrazio handiak aurkitu baitira garai hartako arroka sedimentarioetan.

JURASIKOA ETA KRETAZEOA: DINOSAUROEN KLIMA

Triasikoaren amaieran Pangea pixkanaka hausten hasteak klima global hezeagoa eragin zuen Jurasiko osoan (duela 208 milioi urtetik duela 146 milioi urtera).

Itsasoaren maila igo eta ozeanoetako ura lehorreara sartzen, eskualde kontinental handiak ur azpian geratu ziren, eta itsaso berriak sortzen hasi ziren. Urpean geratutako lurren hedadura hazteak plane-



taren albedoa txikitu zuen eta eguzki-energiaren xugapena hazi. Hortaz, hezetasun gehiago zegoen airean, eta horrek berotegi -efektua eragiten duenez, klima globala beroagoa bihurtu zen.

Kubeta ozeanikoetan izandako aldaketa topografikoak izan daitezke itsasoak igo izanaren kasua, plaka tektonikoen banaketa-erritmoa azkartzearekin eta ozeanoen zolako hausturetatik ateratako laba-estrusio handiekin lotuta. Horren ondorioz, itsasoek eta ozeanoek sakonera galdu zuten, eta zabaldu egin ziren. Transgresioetan, itsaso urak kubeta ozeanikoe-tatik gainez egiten zuen, eta lehen lehorrak ziren kostaldeko eskualde asko hartzen zituen. Beste teoria espekulatiboago baten arabera, Lurraren ardatzaren inklinazioan ba-t-batean izandako aldaketek igoarazi zuten itsasoaren maila, eta, aldi berean, eragina izan zuten urak eskualde batzuetan beste batzuetan baino gehiagopila-tzean.

Halaber, berotze handiko gertaera klimatikoei buruzko datuak daude, agian, itsas zorupeko metanoa atmosfera masiboki askatzeak eragindakoak.

Gertaera haietako bat Toarciar estaian izan zela pentsatzen da, duela 183 milioi urte inguru. Agian, itsas maila igozteak eta presio hidrostatikoaren aldaketek kostaldeetako zorupeak ezegon-kortu zituen; horrek itsaspeko lurren eraketak eragin zituen kate-an, eta, ondorioz, metano-kantitate handiak askatu ziren. Metano-estrusioak hasierako berotzea indartuko zuen, eta, beharbada, suntsipen masiboa eragingo zuen itsasoan, uretan disolbatutako oxigeno guztia oxidatu eta kontsumitu ondoren sortutako anoxia-baldintzen eraginez. Hala, bimetrotik gorako lodierako lokatz organikozko geruza bat sedimentatu zen zen-bait itsas eskualdetan. Geruza haren karbonoa oso pobrea zen karbono-13 isotopotan, hain zuzen, metanoaren ohiko ezaugarrietako batean.

Kretazeoan ere -orain dela 145 milioi urte hasi eta dinosauroak desagertzean (orain dela 65 milioi urte) amaitu zen- klima hezea eta beroa izan zen denborarik gehienez. Kreta-estratu lodietan



tik hartu du izena periodoak. Itsaso guztietan ugaldutako kokolitoen eta foraminiferoen kare-oskolez osatutako kareharriak dira kretak. Ordu arte, plataforma kontinentaletako sakonera gutxiko uretan bakarrik sedimentatzen ziren kareharriak.

Periodoaren erdialdera, orain dela 100 milioi urte gutxi gorabehera, planetaren gainazaleko batez besteko tenperatura gaurkoa baino 6-12 °C altuagoa zen. Tropikoetako koralezko arreziferrrenda, berriz, gaurkoa baino dezente zabalagoa zen latitudinalki, gaur egun baino. Dinosauroak odol hotzeko animaliak ziren, ziur aski, eta hobeto moldatzen ziren klima beroetara hotzetara baino. Hala, urgaineratutako ia lur guztietan bizi ziren, eta zirkulu polarretaraino ere hurbiltzen ziren. Beroaren, hezetasunaren eta CO2-aren kontzentrazio handiaren eraginez, garai hartako biomasa begetala ugariagoa zen, eta, zenbaiten arabera, hori izan daiteke dinosauro asko hain handiak izatearen arrazoi bakarra.

Artikoko ur sakonetan aurkitutako fosilak aztertuta, kalkulatu dute uren batez besteko tenperatura 15 °C eta 20 °C artekoa izango zela. Gaur egun, klima beroetan ohikoak diren landare eta animalia batzuk -adibidez, krokodiloen antzeko uretako zenbait narrasti (*Champosaurus*)- goi latitudeetan, ia polarretan, bizi izan ziren. Bestalde, Groenlandiako sedimentuetan Ogi Zuhaitzaren (*Artocarpus dicksoni*) hostoen aztarnak aurkitu dituzte. Gaur egun, klima heze tropikaleko eskualdeetan bakarrik hazten da espezie hori.

Dena den, horregatik ez da pentsatu behar poloetan neguan ere hotza egiten ez zuenik. Australiako hego-ekialdean -garai hartan 60 °C S-an kokatuta zegoen- lurzoru izoztuen aztarnak aurkitu dira eskualde hartan bizi ziren dinosauroen eskeletoen ondoan. Baliteke dinosauro haietako batzuk odol beroak eta hotz handiak jasateko gai izatea, edo baliteke ere soilik udan migratzea eskualde haietara. Gainera, tillitarik aurkitu ez arren, icebergeek garraiatutako arroken higakinak dituzten Kretazeoko itsas sedimentuak aurkitu dira, eta horrek esan nahi du, agian, kasko glaziar txikiak zeudela goi-latitudeetan.



Edonola ere, nagusiki klima bero eta hezetasun eratzaren diren ikatz-metaketak ere ugariak dira Kretazeoan, eta latitude guztietan banatuta ageri dira haien aztarnak. Haien zuzen, garai hartan eratu ziren Estatu Batuetako mendebaldean aire zabalean ustiatzen ari diren aztarnategi handiak. Halaber, bauxita-metaketak aurkitu dira nahiko goian dauden latitudeetan. Bauxitak klima tropikala behar du, eta urtaroen arabera euri-erregimen berezia. Beraz, horrek ere adierazten du garai hartako klima globala beroagoa eta uniformeagoa zela.

Eta zein dira, batez ere, duela 120 milioi urte eta 90 urteen artean izandako klima bero eta heze haren kasuak? Batez ere, hauek aipatzen dira: CO2-aren eta lurrunaren kontzentrazio handia; klima ozeanikoagoa (itsaso eta kontinenteen banaketari esker, tropikoetako ur beroak poloetara joaten ziren, eta, hala, tenperaturak uniformeagoak ziren); eta hezetasunaren garraio meridiano handiagoa tropikoetatik goi-latitudeera, eta, ondorioz, bero handiagoa eta prezipitazio indartsuagoak goi-latitudeetan.

CO2 ETA LURRUN UGARI

Garai hartan, atmosferako CO2-aren kontzentrazioa egungoa (380 ppm) baino askoz ere handiagoa zen ziur aski (900 ppm eta 3.300 ppm artean), oraindik nahiko zehaztugabeak eta badaezpada samarrak diren kalkuluen arabera. Hain zuzen, orduan garatu eta ugaltu ziren angiospermoak; landare loredun horiek CO2-aren kontzentrazioa 1.000 ppm eta 1.500 ppm artekoa denean lortzen dute fotosintesarako eraginkortasun handiena.

CO2-aren maila horien kalkuluak hainbat datutan oinarritzen dira. Batetik, paleolurzoruen karbono organikoaren azterketa isotopikoa egiten da; paleolurzoru jakin batek karbono-13an duen



murriztu egiten dela. Hala, horretatik ondorioztatu da aireko karbono dioxidoaren kontzentrazioa handiagoa denean hostoek estoma gutxiago izateko joera dutela.

Uste da CO2-aren kontzentrazio handi hura ozeanoaren zolako haustura tektonikoetan gertatzen zen desgasifikazio bolkaniko handiari zor zaiola. Haustura haietatik ari ziren bereizten, eritmo bizian, Pangea osatzen zuten kontinente-pausak. Jurasikoaren hasieratik. Hain zuzen ere, Atlantikoko (Karibe), Indiako Ozeanoko (Kerguelen) eta Ozeano Bareko (Ontong Java) uretan dauden plataforma basaltiko handiak Kretazeoaren erdialdekoak dira.

Baina berotegi-efektua ez zen handitu CO2-agatik bakarrik, baizik eta, batez ere, atmosferako lurrun-kantitatea handitzeagatik. Gaur egun, lurrunaren berotegi-efektua latitude tropikaletara eta ertainetara mugatzen da kasik, eta ez du ia batere eraginik goi-latitudeetan airearen hezetasun absolutua oso baxua baita hotzaren eraginez. Hala, lurrunak airean duen kontzentrazioa % 4koa izan daiteke ekuatoreko eskualde heze batzuetan, eta % 0,0001ekoak bakarrik Hego poloko neguan. Kretazeoan, ordea, latitude polarretako aire-masek askoz ere tenperatura altuagoak zituztenez, haien ahalmen higrometrikoa ere handiagoa izango zen, eta, ondorioz, berotegi-efektu handia eragingo zute.

KLIMA OZEANIKOAGOA

Berotegi-gasen kontzentrazio handiagotz gain, baliteke beste klima-faktore garrantzitsu batek ere eragina izatea: itsasoen eta kontinenteen forma. Forma hura lagungarria izan zitekeen itsaslastarren joan-etorriarentzat, eta, beraz, poloetar tropikoetako bero gehiago iristen lagundu zezakeen. Beste alde batetik, kontinenteak (adibidez, Europa) uharte handitan eta txikitik zatituta egoteak ere leundu egiten zituen urtaroen arteko osziliazioak, eta neguko klima gogorak saihesten.

Itsasoaren maila igo egin zen -lehenago ere igoa zen Jurasikoan-, eta egungo kontinenteen % 20 estaltzen zuen, sakonera txikian batez ere. Itsas maila hura periodoren erdia igaro berrian heldu zen bere gorenera, Cenomaniar estaiko transgresioan. Tetis itsaso zabal eta ire-



kiak (Mediterranoaren aurrekoak) Europako eta Afrikako eremu zabalak zeuzkan azpian, eta, ekialdetik, Artikoarekin zegoen loturik, sakonera txikiko itsaso baten bidez. Europa uhartedi bat zen, eta hango sakonera txiki-ko itsasoetan kareharritzko eta koral-harrizko ohiko meta- ketak eratu ziren. Ipar Amerika ere barne-itsaso batek erdi- bitua zegoen (mendebaldeko eta ekialdeko zatia). Itsaso hura Mexikoko golkotik sartzen zen iparralderantz, eta, batzuetan, Artikoraino ere iristen zen.

Itsasoen eta kontinenteen formek eragin handia zuten, ez soilik gainazaleko itsaslasterren sisteman, baita ur sako- netako itsaslaster termohalinoetan ere.

Pentsatzen da Kretazeoaren erdialdean ozeanoko ur sakonek 15 °C-ko tenperatura zutela, batez beste; gaur egungo 2 °C-ko hotz horiek baino askoz altuagoa.

Agian, garai hartako hondoko ura gaur egungoa ez beza- lako latitudeetatik zetorrelako gertatzen zen hori. Gaur egun, ozeanoetako ur sakonak latitude polarretan hondo- ratutako azaleko uretatik datoz; baina, orduan, sakoneko ur gehienak latitude tropikaletan sortuko zirela pentsatzen da. Izan ere, Europako hegoaldeko sakonera txikiko itsa- soetan eta Atlantiko jaioberrian, lurrunketa handia gerta- zen zen; horrek askoz ere gaziagoak eta dentsoagoak bihurtzen zituen urak, eta, horregatik, artean beroak zirela hon- doratzen ziren. Hala, sakoneko ur-masa bat eratzen zen, baina nahiko beroa. Sakoneko ur-masa bero hura, gero, itsaso guztien hondoan hedatzen zen, iparralderantz nahiz hegoalderantz. Antzeko zerbait egiten dute Mediterraneoko ur sakonek gaur egun, Gibraltarreko itsasertik Atlantikora doazenean.

Antzeko urak ere askoz beroagoak ziren latitude epeletako eta goi-latitudeetako itsasoetan. Baina zalantza handiagoak ditugu latitude tropikaletako azaleko uren tenperaturaz, zeren, nahiz eta uste izan den gaur egungo tenperaturaren antzekoa zela, foraminiferoen azterketa isotopikoaren hausnarketa berri batek eakusten du ur haiek ere beroagoak zirela ziur aski.

KARBONOAREN SEDIMENTAZIO HANDIA

Halaber, Erdi Kretazeoan, gertaera anoxikoak izan ziren ozea- noetan, hau a, tarteka ozeanoaren hondoa -bereziki, Tetis itsa- soaren mendebaldeko arroa eta Ipar Atlantiko tropikalekoa- oxi- genorik gabe geratzen zen. Horren ondorioz, deskonposatu gabeko materia organiko asko metatu eta lurperatu zen, eta, eskualde askotan, kareharri beltzen metaketa handiak sortu



ziren horrela. Pentsatzen da gertaera haietan bakterio aerobiko kopuru izugarriak hilko zirela eta arkeak asko ugalduko zirela. Itsasoko pikoplankton-mota bat dira arkeak, energia sortzeko oxigeno molekularrik eta argirik behar ez dutenak. Albiarreko (orain dela 112 milioi urte) gertaera anoxikoetako sedimentu bat- zuen masa organikoaren % 80 arkeak dira.

Ohiko kareharri beltzez gain, petrolio-erreserba ezagunen % 60 ere Kretazeoan sortu zen, bai eta hareharri bituminoso kantitate handiak ere. Kareharri horren karbono organiko edukia handia- goa izan daitekem balio absolututan, ezagutzen diren ikatz- eta petrolio-erreserba guztiena baino.

Cenomaniarraren eta Turoniarraren arteko trantsizioan (orain duela 94 milioi urte) gertatu zen gertaera anoxikorik handiena. Gertaera hura Tarfaya-ko itsasertzean (Maroko hegoaldean) xeheki aztertu ahal izan da; han 500 metrotik gorako lodiera duten sedimentu biogenikoak estratutan xaflatuta ageri dira.

Hauek izan daitezke, txandaka, gertaera anoxiko kausak:

* Gaizazaleko produktibitate biologikoaren gehikuntza handie- gia, eta, ondorioz, oxigenoa agortzea. Produktibitatearen haz- kunde hori bi arrazoiengatik gerta zitekeen: transgresioetan urez estalita geratzen ziren kostaldeko eskual- deetatik zetozen mantengai ugariengatik edo kostaldeko itsas hondotik azaleratzen ziren ur hotz eta emankorregatik, orain Marokon bertan eta munduko beste kostalde batzuetan gertatzen den bezalaxe.

* Urak estratifikatzea, azaleko maila gehiegi berotzearen eraginez. Horrek ur sakonen airez- tatze fisikoa galarazten zuen, baita deskonposi- zio organikoa ere. Euriteek gainazaleko geruza- ren gazitasuna murrizten eta estratiikazioa han- ditzen laguntzen zuten. Gainera, pentsatzen da zirkulazio termohalinoa askoz ahulagoa izango zela, eta, hondoratze-lekuak tropiloan zeudenez, ur sakoneko masak sortuko ziren, ez hain hotzak eta, aldi berean, oxigenazio txikiagokoak.

KREIDE/TERTIAR KATASTROFEA

Kretazeoaren azken partean -duela 80 milioi urte

eta 65 milioi urte bitartean- atmosferako CO2-aren kon- tzentrazioak beherakada han- dia izan zuen, berriz ere, eta, horrekin batera, itsasoak konti- nenteetan atzera egin zuen.

Itsas erregresioek aintzira- eremu izugarri zabalak uzten zituzten atzean. Sakonera txiki- ko aintzia eta paduren paisaia hartan, materia organiko kanti- tate izugarriak lurperatu ziren. Ondorioz, atmosferak CO2 ika- ragarri galdu zuen, eta gas horren kontzentrazioa 600 ppm ingurura jaitsi zen periodoaren azkenean, Klima dezente hoztu zen, Erdi Kretazeoko optimo termikoarekin alderatuta, baina nahiko bero eutsi zion, eta ez zen izan glaziaziori. Esate bate- rako, Ozeano Artikoa udan bedern ez zen izotzen, diato- meo silizeoen ugaritasunak adierazten duenez. Bestalde, garai hartako Alaskako eta Antartikako penintsulako florak adie- razten du orduko tenperaturak gaur egungoak baino dezente altuagoak zirela. Baina okerrrena heltzear zegoen.

Hala Kretazeoaren amaieran, Kretazeotik Tertziariorako trantsi- zioko K/T gertaeran (alemanaren Kreide /Tertiar hitzetatik dator) -duela 65 milioi urte-, itsasoetan eta kontinenteetan nagusi izan- dako zenbait espezie desagertu ziren. Itsasoen ammoniteak eta plankton-kantitate handiak desagertu ziren, eta, kontinenteetan, berriz, dinosauoak -batzuk besteak baino azkarrago-, zenbait teoria polemikoren arabera. Landaretza ere erotik aldatu zen, batik bat, Ipar Amerikan. Eredü horretako baso guztiak desa- gertu ziren, eta, katastrofearen ondoren, iratze-estalki trinko batek kolonizatu zituen lur guztiak.

Zenbaiten iritziz, hondamendia oso azkar gertatu zen (milaka urte batzuk, gehinez); baina, beste batzuen ustez, espezieak pixkanaka-pixkanaka joan ziren suntsitzen (milioika urte batzue-



tan), eta, areago, Kretazeoaren amaiera baino zenbait milioi urte lehenago hasi zen sortzen hondamendi hura.

Hipotesi nagusiaren arabera, bat-bateko klima-aldaketa baten ondorioz desagertu ziren dinosauoak. Baina ez dago batere garbi zerk eragin zuen klima-aldaketa hura: meteorito handi baten talkak edo sumendien jarduerak.

Chicxulub-eko meteoritoa

Suntsipen azkarrean sinesten dutenek uste dute bolido estralur- tar bat erori zela. Yucatan penintsularen kostaldearen parean, Chicxulub-en, sakonera txikiko itsaso tropikal lasai bat zen lekuan, hamar bat kilometroko diametroa zuen asteroide ikara- garri bat erori zen, eta 180 kilometro inguruko kratera egin zuen. Gaur egun, bi kilometroko lodierako sedimentu-geruza baten azpian lurperatuta dago krater hura. Bolidoak hego-ekialdeko ibil- bidea egin zuen, eta ez zen perpendikularki erori, zeharka bai- zik, eta, horren ondorioz, are hondamen handiagoa eragin zuen.

Hala, asteroideak, jaurtita- ko materialek Estatu Ba- tuetako hegoaldeko kosta txikitu zuten bereziki, han aurkitutako tsunami erral- doi batzuen aztarnak era- kusten dutenez.

Talkaren ondoren, desinte- gratutako asteroidearen iri- dio-geruza estralurtar me- he bat Lurraren gainazal guztian jalki zela uste da. Inpaktuaren beste azpipro- duktu batzuk ere lurralde zabaletan hedatu ziren: batetik, mikrosferulak (beira-ttanta mikroskopi- koak; atmosfera zipriztindu zuen talkan urtutako mate- riala oso bizkor hoztearen emaitza) eta, bestetik, kuartzo metamorfitatuzko kristal txiki-txikiak. Iridioa



kontzentrazio handitan ageri da Maastrichtiar estaiko buztin-estratuen artean, eta horrexek markatzen du Kretazeoaren amaiera. Alvarez aita-semeeek aurkitu zuten lehen aldiz iridioa Gubbio eskialdean (Italia), eta haien teoriaren arabera, gertakari horrek lotura zuzena du dinosauroen suntsipenarekin.

Pentsatu izan da inpaktu handi hark hauts-kantitate ikaragarriak botako zituela estratosferara, eta horrek hilabete edo, agian, urte batzuetako iluntasuna eta hotza ekarriko zituela. Horrek eragina izango zuen itsasoetako eta kontinenteetako jarduera fotosintetikokan eta, ondoren, kate trofiko beste elementu batzuetan (adibidez, ammoniteak itsasoan, eta dinosauroak lehorrean).

Halaber, pentsatu izan da hauts guztia euri azido gisa jalkiko zela. Hark itsasoan eta kontinenteen gainazaleko eremu handiei eragingo zien, eta itsasoko bizia eta kontinenteetako landaretzaren zati handi bat kutsatuko zituen.

Yucatango penintsulako sedimentuetan, adibidez, ebaporita asko dago; batez ere, kaltzio sulfatoz osatuta dagoen arroka da ebaporita. Asteroideak sulfatoa jotzean, sufre dioxidoa sortuko zen; sufre dioxido kantitate masiboak airean lurrunduko ziren, eta azido sulfuriko bihurtu. Hortik etorriko ziren euri azidoak. Horrez gain, estratosferako sulfato-geruzak Lurra luzaroan estali, eta klima hoztuko zueka pentsatzen da.

Litekeena da, halaber, sulfatoek estratosferako hodeiak handiago bihurtzean, ozono-kontzentrazioa modu katastrofikoan jaitsaraztea. Iragan urrun hartan hori gertatu zela uste izateko, datu honetan oinarritzen dira: azken hamarkadetan erregistratutako ozono-murrizketa handiena 1991ko ekainean izan zen. Pinatubo sumendiaren erupzioan sulfato-kantitate handia estratosferara jaurti ondoren.



Halabe, baliteke bolido estralurtarrak kare-plataforma bat jotzea, eta, ondorioz, kareharria lurrundu, eta milaka gigatona CO₂ igortzea atmosferara. Hala, hasierako iluntasunaren eta hotzaren ondoren, klima berotu egingo zen, eta aldaketa handia gertatuko planetako ekosistemetan.

Dekkan-eko erupzioak

Beste hipotesi baten arabera sumendien erupzioak dira Kreide/Tertiar katastrofearen kausa nagusia. Indiako Dekaneko plataforma basaltiko zabalak orduan eratu ziren, gutxi gorabehera, eta sumendi-jarduera handiko garaia izan zela erakusten dute. Baina zer eragin hilgarri izan zuten sumendiek?

Zenbaiten arabera, sumendien hautsak eta aerosol sulfurosoek atmosferan sortutako errezelaren ondorioz, Lurraren gainazala hoztu egin zen, eta dinosauroek ez zuten jasan hozte hura. Sufre dioxidoa (SO₂) pixkanaka oxidatu eta SO₃ bihurtzen da. SO₃-a atmosferako lurrunarekin konbinatzean, azido sulfurikoa sortzen da, zeinak tanta horixkaz osatutako hodei sulfatatuak eratzen baititu. Horiek eguzkiaren argia islatzen dute espazioan, eta beheko geruzak hozten dituzte. Hodei horiek estratosferan eratzen badira -erupzio handiak direnean eta altuera handira iristen gertatzen da hori-, tantak ea izotz-kristalitoak denbora luzeagoan egoten dira esekita, euriak ez baititu garbitzen. Ondorioz, hozte-efektua handiagoa da. Teoria horren arabera, sumendiek SO₂ kantitate handiak isuriko zituzten zenbaitetan, eta horrek zerua estaliko zuen, eta intsolazio-maila jaitsaraziko.

Hala eta guztiz ere, datazio berrien arabera, Dekkaneko sumendien jarduera hura suntsipen handia baino ehunka mila urte lehenago gertatu zen.

Zenbaitek bi teoriak konbinatzen dituzte: lehenik eta behin, sumendiek isuritako gasek klima-aldaketa eragin zuten, eta horrek Lurreko bizia ahuldu zuen. Eta, ondoren, asteroidea erortzean, gainbehera hura areagotu egin zen.



ERA TERTZIARIOA

(65 Ma-2,5 Ma)

Zenoziokoa -era Tertziarioak eta Kuaternarioak osatzen dute- duela 65 milioi urte hasi zen, eta klima-bilakaera oso konplexua izan zuen.

Hasieraan, klima beroa izan zuen -ez zegoen izotz-geruzarik, ez Antartikan ez Groenlandian-; amaieran, berriz, klima hotzera pasatu zen; eta azken bi milioi urteetan, ziklikoki, kontinente-eremu handiak izotzez estali dituzten glaziazioak gertatu ziren. Atmosferako CO₂-a ia etengabe galtzea izan zen hozte haren kausa eta ondorioetako bat. Hala, Zenoziokoaren hasieran 2.000 ppm-ko kontzentrazioa izatetik duela milioi bat urtetik hona 300 ppm-tik beherakoa izatera pasatu zen.

Baina batez besteko tenperaturaren jaitsiera ez zen uniformea izan denboran, eta, aldi batzuetan, tenperaturak igo eta izotz-eremuak txikiagotu egin ziren. Gainera, aldi bateko klima-aberrazio modura, oso irauoen laburreko gertaerak ere izan ziren, zeinetan tenperaturek igoera edo jaitsiera handiak izan baitzituzten. Horrelako hiru gertaera bereizten dira: duela 55 milioi urte gertutako berotzea, duela 34 milioi urteko hoztea eta duela 23 milioi urteko beste hozte bat.

PALEOZENOKO ETA EOZENOKO KLIMA BEROA

Tertziarioko lehenengo periodoa, Paleozenoan (65 Ma-54 Ma), Kretazeoko garai oso bero batzuen antzeko klima izan zen. Eskualde artikoetan, adibidez, krokodiloak eta dortokak bizi ziren, eta Kamtxatka penintsulan palmondoak hazten ziren. Artikoa gaur egun baino txikiagoa zen, eta komunikazio ezegonkorragoa zuen Atlantikoarekin. Halaber, askoz ere sakonera txikiagoko urak zituen; gezagoak eta askoz ere beroagoak. Itsasoko uraren tenperatura ere gaur egun baino zenbait gradu altuagoa zen, azalean zein sakonean. Atlantiko plankton subtropikalak gaur egun baino 15° iparralderago iristen zen, eta koralek gaur egungo banda tropikala baino zabalagoa okupatzen zuten. Itsaslasterak eta zirkulazio termohalinoa ere gaurkoak ez bezalakoak ziren. Zenbait faktore aipatu izan dira Tertziarioaren hasierako klima bero hura azaltzeko:

* Atmosferako zirkulazio zonalagoa (mendebaldeko haize indar-



tsuagoak Artikoren inguruan).

Ereduen arabera, Ozeano Artiko itxian -non, orain ez bezala, behepresioa egongo zen beti- mendebaldeko haizeak indartzeak berotu zituen goi-latitudeak. Mendebaldeko haize indartsu haiek aire-masa epel eta heze gehiago ekarriko zuten Ozeano Baretik eta Atlantikotik Ipar Amerikara eta Eurasiara, hurrenez hurren, eta kontinenteen barnealdea berotuko zuten.

Gainera, Artikoko behe-presioak azaleko itsaslasterren zirkulazioa eragingo zuen ozeano hartan. Horrek ahuldu egingo zuen egungo Beaufort biraketa, eta izotza eratzea zailduko. Hortaz, Tertziarioaren lehen partean, AO indizea (Arctic Oscillation) oso positiboa izango zen. Artikoko depresio handiari esker, eta horrek mendebaldeko haize indartsuak ahalbidetuko zituen. AO indizea Artikoko behe-presioen eta Ipar hemisferioko goi-presio subtropikalaren arteko diferentzietan oinarritzen da (OA indizeari, batzuetan, NAM ere deitzen zaio, hau da, Northern Hemisphere Annular Mode).

Baina Ozeano artikoa itxiegia zen Tropikotik zuzenean zetorren bero ozeanikoaz baliatzeko. Tetis itsaso zabalaren eta Artikoren arteko komunikazioa oso txikia zen: batetik, Mendebaldeko Siberiako sakonera txikiko itsasoak eta, bestetik, Groenlandiaren eta Eskandinaviaren arteko itsasarteak lotzen zituen. Ondorioz, zirkulazio ozeanikoak zailtasun handiak zituen bero tropikala latitude ertanetara eta goi-latitudeetara garraiatzeko.

* Karbono dioxidoaren eta metanoaren kontzentrazio handia.

Eozenoaren hasierako atmosferako CO₂-aren kontzentrazio handia ere aipatu izan da klima bero haren kausa gisa (egile batzuek diote 2.000 ppm baino handiagoa zela). Baliteke magmaren degasifikazio handiko garai batek eragitea kontzentrazio hori, eta, aldi berean, degasifikazio hori garai hartan izandako plaka tektonikoen mugimendu-eritmo handi baten gertatzea. Batez ere, Atlantikoko irekidura-eremuan -Groenlandia, Islandia eta Norvegia artean-, Alaskan eta Asian -Indiako plakaren iparraldeko ertza Asiako hegoaldearen azpian sartzen ari zen lekuan- gertatu ziren mugimendu haiek.

Teoria berriago baten arabera, sute ikaragarri batzuek eragin zuten CO₂-aren kontzentrazio



altua. Garai hartako klima lehorra eta beroa izanik, baliteke sute haiek garai hartako zohikaztegi handiei eragitea. 1997an Indonesian gertatukoaren antzeko fenomeno da -CO₂-a nabarmen haztea eragin zuen urte hartan-, baina askoz ere proportzio handiagoan.

Halaber, hondoko urak berotu ondoren, itsas zorupetik ateratako metano-kantitate handiak oxidatzen eragin zezakeen karbono dioxidoaren gehikuntza. Sedimentuak karbono-13 gutxiak izateak jatorri hori frogatzen duela dirudi. Norvegiako kostaldean garai hartako egitura geologiko batzuk aurkitu dituzte berriki, dirudienez, metanoa atera zen itsaspeko arrakalei dagozkienak. Metano hura izoztutako hidrato moduan harrapatuta egongo zen, klatratoek desizoztu, eta aske geratu zen arte.

Atmosfera iristean, askatutako metanoa oxidatu, eta CO₂ eta lurrun bihurtuko zen, eta, ondorioz, bi edo hiru aldiz handituko zen atmosfera-karbono dioxidoaren kontzentrazioa.

Karbono dioxido hura uretan disolbatzean, karbonoaren kimika ozeanikoa aldatu egin zen. Disoluzio hark itsasoko ura azidotu zuen, eta karbono ioien kontzentrazioa murriztu. Hori konpentsatzeko, lisoklinak gora egn zuen, eta itsasoko kaltzita disolbatu egin zen, berriz ere, ozeanoetako sedimentuetan ikusten denez. Teoria horrekin lotutako beste hipotesi baten arabera, Artikoko subdukzio tekniken mugimenduek materia organikotan aberatsak ziren sedimentuak hondoratu zituzten. Sedimentu haiek metanoa sortuko zen, eta metano hura airera aterako zen estratuetan irekitako tximinien bidez.

* Hodei estratosferiko gehiago.

Azkenik, beste batzuek diote, beharbada, estratosferako hodeiekin osatutako estalki lodi handi bat, eta estalki hark ez ziola uzten ihes egiten troposferako beroari. Santa Cruz-ko Unibertsitateko ikertzaileek faktore hori gaineratu dute. Eozenoaren hasierako goi-latitudeetako klima beroaren balizko kausa gisa. Hodeien



berotegi-efektuak erlatboki berotuko zituen goi-latitudeak. Ondorioz, izotz gutxiago eratuko zen kontinenteetan eta ozeanoetan, albedoa txikitu egingo zen eta, beraz, klima beroagoa eta hezeagoa izango zen planeta osoan.

Hodei horiek estratosferan eratzen dira, goi-latitudeetan, lurretik 15 bat kilometroa (altuera horretan, tenperaturak oso hotzak izaten dira), eta berotegi-efektua sortzen dute. Izan ere, nahiz et zehar-rargiak izan eguzki-erradiazioarekiko, nahiko opakuak dia lurretik doazkien erradiazio infragorrientzat, eta, erradiazio infragorriak xurgatu ondoren, berriz ere, behearantz bidatzen dute energia hori. Poloetako hodei estratosferikoak eratzeko, bi baldintza hauek bete behar dira: airean tenperatura oso hotza izatea (75 °C azpitik) eta nahiko hezetasun izatea. Azken baldintza hori ez da lortzen erraza, estratosfera oso lehora baita. Izan ere, troposferako lurruna nekez sartzen da estratosferan, tropopausara (troposfera eta estratosfera arteko mugarra) iritsi aurretik, lurrin hori ur-tantatan eta izotz-kristaletan kondentsatu, eta erori egiten delako. Troposferako metanoa, ordea, iritsi egiten da estratosferara. Horregatik, estratosferako ur gehiena metanoaren oxidaziotik dator. Hortaz, Eozeno garai hartan izandako metano-ekoizpen handiak -parte bat estratosferara igotzen zen, eta, oxidatu ondoren, hezetasuna sortzen zuen- azalduko luke estratosferako hodei-kopuru handia. Litekeena da, era berean, CO₂-aren gehikuntzak zirkulazio orokorrean eragindako aldaketek lurrin gehiago sarrazazi izana estratosferan.

Goi Paleozeneko Maximo Termikoa

Eozenoarekin muga, orain dela 55 milioi urte inguru, are gehiago igo zen tenperatura, eta gutxi iraun aldi bero bat izan zen.

Bat-bateko berotze bat izan zen, apenas 80.000 bat urte iraun zuena, baina animalien biziaren eboluzioan sekulako eragina izan zuena. Horrekin batera, fauna asko desagertu zen, kontinenteetan nahiz ozeanoetan, eta ugaztun-ordena berri ugari agertu ziren. Harrezkero, horiek dira nagusi animalia-erreinuan. Flora, berriz, egokitu egin zen, hostoen fisionomia aldatuz eta goi-latitudeetara migratuz.

Kontinenteetako tenperaturak nahiko altuak ziren dagoeneko, eta beste 5-7 °C igo ziren. Antartikaren kostaldeko azaleko urak 13 °C-tik 20 °C-ra pasatu ziren, eta Artikokoan 24 °C-ra iritsi ziren. Eskualde subtropikaletako urak ere berotu egin ziren, baina eragina nabarmenagoa izan zen goi-latitudeetan.

Itsasoetan, hondoko uraren tenperatura egunkoa baino 12 °C altuagoa izatera heldu zen, Kretazeoaren erdi beroan bezala. Sakoneko uren sorleku nagusia aldatu egin zen, Hego hemisferioko itsaso hotzetatik Ipar hemisferioko beroagoetara, eta, agian, horregatik gertatu zen igoera hura. Sedimentuen karbono-13aren azterketak zirkulazioaren bat-bateko aldaketa hori adierazten du. Pentsatzen da PETMko aldi bero hura metanoen eta karbono dioxidoaren bat-bateko gehikuntzak sortuko zuela. Badirudi sedimentuetako karbono-13aren bat bateko igoera eta jaitsierekin frogatzen dutela metanoaren gehikuntza hura. Metanoak, jatorri biologikoa dela eta, oso gutxi du isotopo horretatik. Diotenez, ozeanoen hondoko sedimentuetako izotz-kristaletan harrapatuta zegoen metanoak sortu zuen metano-estrusio handi hura. Itsasoaren hondoko urek bero-maila jakin bat gainditu eta metano-hidratoak desizoztu ondoren gertatuko zen gas-erupzioa. Baliteke zirkulazio ozeanikoan izandako aldaketa batek abiaraztea prozesu hura.

Ez da baztertzeko metano hura guztia latitude tropikaletako eta ertainetako hezegune zabaletako bakterio-ekoizpen handiaren emaitza ere izatea. Edo, bestela, goi-latitudeetako zohikaiztegiak egon daitezke oinarrian. Edonola ere, gertaeraren bortiztasunak sinesgarriago egiten du itsasoko zorupean izotz-tako hidratoak urtzaren teoria.

Behe Ezenoko Optimo Klimatikoa

Paleozenoaren amaierako aldi bero laburren ondoren, tenperaturak behera egin zuen, baina Eozenoaren lehen partean tenperaturak altua izaten jarraitu zuen, duela 50 milioi urte ingurura arte. Bereziki Artikoko egoera nabarmendu behar da, ez baitzegoen izotik eta neguak gaur egun baino askoz ere epelagoak baitziren. ACEX (Arctic Coring Expedition) proiektua dela-eta berriki egindako azterketetan, 20 °C-ko tenperaturan ohikoak diren mikrofosil sedimentarioak aurkitu dituzte Ipar polotik gertu.



HOZTEAREN HASIERA

Duela 50 milioi urte inguru, Behe Eozenoko Maximo Termikokoaren (IETM) ondoren, joera termikoa alde-rantzikatu, eta tenperaturak behera egiten hasi ziren. Handik aurrerako Eozeno guztian, ia Europa eta Asia osoan, klima hotzagoa eta lehorragoa bihurtu zen. Garai hartan hasi zen eratzen, eskala geologiko luze batean eta Oligozenotik aurrera, hozkailu-periodo esaten zaiona. Oraindik periodo horren barruan gaude, urtaro guztietan izotz-geruza handiak izaten direlako (Groenlandia eta Antartika). Itsas hondoko uarren tenperaturaren bilakaera da hozteko joera horren datu esanguratsuenetako bat.

Izan ere, duela 50 milioi urte, 12 °C-koa izatetik, Eozenoaren amaieran (orain dela 35 milioi urte) 6 °C-koa izatera pasatu zen. Gaur egun, ozta-ozta heltzen da 2 °C-ra.

Uste izan da hozteko joera horren lehen kausa atmosferako CO₂-aren kontzentrazioaren beherakada izan zela; Paleozenoko eta Eozenoaren hasierako klima beroan gertatu zen beherakada, hain zuzen. Itsasoko sedimentuen alkenonetan oinarritutako azterketa berri batek CO₂-aren kontzentrazioaren jaitziera horren gorabeherak zehaztu ditu. Horren arabera, Eozenoaren hasieran 1.500 ppm izatetik Oligozenoaren erdi aldean 500 ppm izatera pasatu zen CO₂-aren kontzentrazioa.

Zenbait sodio-karbonatu motaren kristaltzea aztertuta ere, gauza bera ondorioztatu da. Hala, nakolitaren ordez izandako trona-prezipitazioak -karbonatoaren beste aldaera bat- adierazten duenez,

Eozenoan zehar, atmosferako CO₂-aren kontzentrazioa murriztuz joan zen.

Teoria horren arabera, ozeanoko planktonaren hazkunde handiak atmosferako CO₂-aren parte handi bat xurgatu zuelako amaitu zen aurreko klima beroa. Itxura denez, barita (bario sulfatoa, jatorri biologikoko minerala) askoko itsas sedimentuek erakusten dute Zenoikoaren hasierako ozeano-produktibitate handia.

CO₂-aren maila jaistearekin batera, klima hoztea eragin zuten beste faktore batzuk gertatu ziren: besteak beste, lurrin gutxitu eta albedoa handitu egin zen, batez ere, itsasoan sortutako izotz-bankisen ondorioz.

Baliteke, halaber, klima beroak berak, hezetasun handiagoga lagun, CO₂ atmosferikoaren galera azkartzea, arroka silikatuak meteorizatuz. Eta, horrekin batera, sumendiek jardura txikiagoa zuten, CO₂ gutxiago isur-

tzen zen atmosferara. Haatik, ozeanogafo batzuen iriziz, CO₂-aren murrizketa ez zen izan faktorerik garrantzitsuena, baizik eta mugimendu geologiko handiek ozeanoetan eragindako zirkulazio-aldaketak, horiek, era berean, zirkulazio atmosferikoa aldatu zutelako. Ozeanoetako zirkulazioan izandako aldaketa garrantzitsu haietako batek ikaragarri lagundu zuen Antartikako izotz-estalkia sor zedin. Estalki hplanetaren albedoa handitu zuen, eta hozte globalari lagundu zion.



OLIGOZENOA: IZOTZAK ANTARTIKA ESTALTZEN DU

Eozenoaren bigarren parteko hozte luze eta leunaren ondoren, Oligozenoaren hasieran -orain dela 34 milioi urte inguru- izugarri hoztu zuen, Oi-1 deritzon bat-bateko gertaeran. Itsasoaren hondoko uraren temperatura 3 °C baino beherago jaitsi zen, eta hotzaren ondorioz, itsas espezie ugari desagertu ziren. Lehorrean ere, oihan borealez jantzitako eskualde asko tundra bilakatu ziren, eta, hegoalderago, lehen baso zirenak, estepa. Eurasiako aztarna paleontologikoek salatzen dute aldaketa handiak izan zirela faunan: animalien migrazioak eta animaliak pila-ka desagertzea, kasu. Hozte global hura Antartikako lehenengo izotz-metatze handiaren dago lotuta. Hasieran, kontinentearen ekialdean metatu zen izotza, mendebaldearen zati handiena urpean baitzegoen artean. Oi-1 izeneko trantsizioko tarte hartan, itsasoko uren oxigeno-18ak gora egin zuen -foraminifero bentikoen azterketak adierazten duenez-, eta horrek frogatzen ditu, batetik, kontinenteetako izotz-metaketa eta, bestetik, itsasoko uraren mailaren eta bolumenaren jaitsiera. Horren gain, bada beste adierazgarri konplexuago bat ere: kalizen disoluzio ozeanikoa -lisoklina- bat-batean sakontzea. Horrek adierazten du, duela 34 milioi urte, aldaketa handia izan zela karbonoaren zikloan, kontinenteetako izotz-metaketei lotuta. Segur aski, itsasoaren mailak behera egitearen ondorioz, karbonatoen sedimentazioa murriztu egin zen kostaldeko sakonera txikiko itsasoetan (itsaso horien hondoak ur gainean ateratzen ziren). Beraz, ozeano irekietako karbonato-masa handitu egin zen, eta, ondorioz, denbora gutxian, lisoklina mila metro beherago gertatu zen, itsas hondoetako azterketa geologikoen erakusten dutenez.



Baliteke zirkulazio ozeanikoan izandako aldaketa batek abiaraztea prozesu hori guztia. Kretazeoaren hasieratik Antartika Hego poloan zentratuta egon arren, ez zuen izotzik izan ordura arte, baina Hego Amerikatik eta Australiatik bakarturik geratzean, itsaslastar hotz batek inguratu zuen. Hala, kontinente australa betirako bakartuta geratu zen, batetik, Drake itsasartea ireki eta Hego Amerikatik banatu zenean eta, bestetik, Tasmaniako hegoaldeko itsasoa ireki eta Australiatik bereziki zenean. Horrela eratu zen itsaslastar zirkunpolar antartiko hotza, zeinak ez baitzien uzten kontinenteraino heltzen eskualde ertain eta tropikaletatik zetozen eta eragin termino leungarria zuten urei. Horrenbestez, neguko izotz-bankisa handi bat eratu zen Antartikako itsasoan, eta, ondoren, izotza hasi zen metatzen kontinentean. Nolanahi ere, agian guztia baino konplexuagoa da Antartika inguruko urak hoztu izanaren kasua. Beste teoria baten arabera, Oligozenoko hoztearenaurretik, iparraldetik etorritako gainazaleko itsaslastar beroak ez zuten bero mantendu Antartikako kostaldean, baizik eta kostalde hartan azaleratzen ziren ur-masa gazi eta epelek. Ur haiek ere eskualde tropikaletatik zetozen, baina itsasoaren sakoneratik. Sakoneko ur-masa haiek Tetis itsaso tropikal handiaren kostaldeko plataformetan sortzen ziren. Ere mu haietako lurrunketa handiaren eraginez, azaleko urak gazitu, loditu eta hondora joaten ziren. Ur haiek hegoalderantz joaten ziren, ozeanoen sakonetik, hari eta Antartika inguruan azaleratu arte. Oligozenoaren hasieran, ordean, Tetis itsasoaren hego-bazterreko plaken tektonikak estutu egin zuen Afrikaren eta Eurasiaren arteko tartea, eta, aldi berean, kostaldeko plataformen zabalera txikituz joan zen, pixkanaka. Ondorioz, eskualde haieten hondoratu eta, ondoren, hegoaldeko latitudeetan azaleratzen zen ur-masa txikituz joan zen.

Antartikako izotza eratzeke kasuak direnak direla, izotz hori hedatzeko prozesua ez da beti uniformea izan; aitzitik, oso litekeena da ezken 30 edo 40 milioi urteetan aurreakadak eta atzerakadak izatea, bereziki, mendebaldeko arro glaziarretan. Antartikaren mendebaldeko hainbat lekutan, izotzaren oinarria itsasoaren maila baino beherago dago. Horrek esan nahi du aldi bateko urtzaldiak izango zirela eskualde horretan. Horren adierazgarri, Antartikaren mendebaldeko hondoko sedimentuetan, egungo izotz-estalkiaren azpian, diatomeoen fosilak aurkitu dira. Pentsatzen da diatomeo horiek izotzik gabeko ur irekitan biziko zirela, gaur egungoa baino garai beroagoetan. Antartiaren mendebaldean aldi

batez urtzearen eta eskualdea azken milioi urte hauetako garai batzuetan urpean egon izanaren beste seinale bat haxe da: izit-estalkiaren azpiko sedimentuetan aurkitutako berilioaren isotopoa (Be-10). Izpi kosmikoek atmosferan sortzen dute isotopo hori, airearekin talka egitean, eta, ondoren, itsasoaren gaizazaleko partikulek xugartzen date, eta harekin batera sedimentatzen dira. Oligozenoaren hasieratik izotz-geruza iraunkor bat izan balitz, Be-10 ez zatekeen sekula iritsiko hondora eta sedimentatuko.

Plaken mugimenduaz eta itsaslastarren aldaketez gain, beste bi faktore aipatzen dira Oligozenoko hoztea azaltzeko: batetik, CO₂-aren maila jaitsi izana -Zenoziokoan zehar gertatu zen, ez dakigu oso ongi zergatik- eta, bestetik, sumendien jarduera.

Sumendien teoriaren arabera, orain dela 30 milioi urte inguru, gaur egungo Somaliaren eta Etiopiaren arteko mugan -Afrikaren adarrean- basalto-kolada itzek batzuk Espainiaren zabalera eremua (500.000 km²) estali zuten; labak 2.000 metroko lodiera zuen toki batzuetan. Gertaera haiek -ia milioi bat urte iraun zutela pentsatzen da, aldizka izan arren- SO₂ kantitate ikaragarriak egotzi zituzten atmosferara. Horrekin batera, ikaragarri hoztu zuen, glaziazioa indartu zen Antartikan, Zenozioko osoko itsas mailaren jaitsierarik handiena gertatu zen eta espezie garrantzitsu ugari desagertu ziren.

Azkenik, foraminiferoen oxigenoaren kurba isotopikoak adierazten du Oligozenoaren amaieran -duela 25 milioi urte inguruberotze-gertaera bat izan zela. Ondorioz, izotzak pixka bat urtu eta itsasoaren maila igo egingo zela pentsatzen da.

MIOZENOKO KLIMA ALDAKORRA

Miozenoaren hasierako parte osoan, Oligozenoaren amaierako temperatura altuak mantendu ziren. Dena den, Oligozenotik Miozenorako trantsizioa Mi-1 izeneko gertaera labur batek markatu zuen. Hala, duela 23,7 milioi urte, sekulako higadura izan zen kontinenteetan, eta planeta osoari eragin zion. Ziur aski, temperatura hozteak eta Antartikako -bereziki mendebaldeko- izotz-metaketa areagotzeak itsasoaren maila jaitsarazi



zuten bat-batean, eta horrek kostaldeko plataformak lehortu eta higaduraren eraginpean utzi zituen. Artean ez zen izotz-estalki iraunkorrik Ipar hemisferioan, eta, beraz, izit-estalki australa hedatzeagatik bakarrik gertatu zen, antza, itsas mailaren beherakada handi hura. Ross itsasoko sedimentuetan berriki egindako zenbait azterketek erakusten dute Oligozenotik Miozenorako trantsizioan aldaketa zikliko batzuk izan zirela Antartikako izotzaren bolumenean, Milankovic-el Kuaternarioko deskribatutako antzeko ziklo orbitalekin lotuta.

Hasierako aldi hotz labur haren ondotik, temperaturek gora egiten zuten atzera, eta Oligozenoan baino altuago mantendu ziren Miozenoaren lehenengo erdi osoan zehar. Antartikako izotzen bolumena murriztu egin zen berriro, eta itsasoaren maila igo. Ipar hemisferioko iparraldeko eskualdeak berotu egin ziren gradualki, eta tundra koniferoz estali zen berriro ere. Beroaren maximo berria Erdi Miozenoan iritsi zen, duela 17 milioi urte eta 14,5 milioi urte bitartean Ozeanoetako eta kontinenteetako fosilek erakusten dutelatitude ertainetako tenperaturak egungoak baino 6 °C altuagoak zirela.

Miozenoaren bigarren partea orain dela 14 milioi urte inguru hasi zen, eta lehen zatia oso bestelakoa izan zen. Ozeano Bareko hego-ekialdeko foraminifero planktonikoen Mg/Ca ratioari buruz egindako azterketaren arabera, bat-batean, 6-7 °C jaitsi zen temperatura duela 14,2 eta 13,8 milioi urte. Hala, temperaturek behera jo

zuten, eta, batez ere, izotz kontinentalaren eremua handitu zen Antartikan. Antartikako izotzen areagotze hura Lurraren ardatzaren inklinazio txikiko periodoei egotzi ohi zaie. Zeihartasuna txikiagoa zenez, udako intsolazioaren intentsitatea ere txikiagoa zen, eta poloen eta tropikoen arteko gradientea handiagoa. Horrek bero- eta hezetasun-transferentzia meridiano handiagoa bultzatzen zuen Antartikarantz. Halaber, CO₂-aren beherakada izan zen, itsas sedimentuetako karbonoaren azterketa isotopikoak adierazten duenez. Zenbait autorenen arabera, une hartan pasatu ginen ordura arte nagusi



izan zen "berotegi" klimatik egungo "hozkaile" klimara.

Azkenik, Miozenoaren amaieran, duela 7 eta 5 milioi urte bitartean, izotz-estalki baten azpian geratu zen kontinente australa, baita Groenlandia ere.

Azken hozte harekin batera, bada beste gertaera klimatiko garrantzitsu bat: idortasunaren hedapena Asiako eta Afrikako eskualde zabaletan. Gainera, fenomeno hori areagotu egin zen Pliozenoan.

Eskala handiko bi gertaera geologiko hauek eragin handia izan zuten seguru asko Miozenoko kliman: Tibet altxatzea eta Mediterraneoa lehortzea.

Tibet altxatzea

Duela 50 milioi urte inguru, Indiako plakak Asiakoarekin talka egitean, hasi zen gora egiten Tineteko meseta, baina Miozenoan izan zuen gorakadak handiena.

Tibeten emertsioak eragin handia izan zuen klima glonalean, eta hainbat ondorio ekarri zituen. Gaur egun, 5.000 metrotik gorako altuera du, batez beste, eta milioi bat kilometro koadrotik gorako azalera. Mesetak ezaguri ezin hobeak ditu ertzetako higadura handia izan dadin. Hala, altua da, aldapa malkartsuak ditu ertzetan eta Indiako Ozeanotik-ur berokoa eta hezetasun handia sortzen duena- gertu dago. Ondorioz, Tibeten euri-jasa handiak izaten dira, eta haiek higadura handiko ibai-lasterrak sortzen dituzte. Tibeten jaiotzen diren ibai handiek -Ganges, Brahmaputra, Indus. Yangzi eta Mekong-munduko ozeanoetara iristen den materia disolbatuaren % 25 garraiatzen dute.

Isurialdeetako klima heze eta beroari esker, atmosferako CO₂-a xurgatzeko bi prozesu garrantzitsu bizkortzen lagundu zuen. Tibetek: silikatoak meteorizatzea eta materia organikoa lurperatzea. Beraz, batetik, meteorizazio-prozesu kimiko bat dugu, zeinaren bidez arroketako mineral silikatuek, euri ugarien laguntzarekin, bikarbonato ioitan disolbatzen baitzuten CO₂-a, eta, ondoren, ibaiek itsasora eramaten baitzituzten bikarbonato ioi haiek. Eta, bestetik, materia organiko begetal kantitate ikaragarria (zuhaitzak belarra eta orbela) higatu eta eramaten zuen prozesu fisikoa dugu. Materia hura guztia Bengalako Golkoan lurperatuta eta sedimentatuta geratzen zen. Kalkuluen arabera, bi prozesu horiek murrizketa handia eragin zuten atmosferako CO₂-an, milioika urte gutxiren buruan. Teoria tradizionalaren arabera,



CO₂-a gutxitzeak berotegi-efektu txikiagoa eragin zuen, eta planetako tenperatura globala jaitsarazi.

Tibet altxatzean, Asiaren hegoaldean eragina duten udako montzoi-euriak areagotu ziren, batez ere, igoera orografikoaren eraginez, eta, horrez gain, Erdialdeko Asiaren eta Txinaren barnealdeko eskualdeak idorragoak bihurtu ziren, mendikateak Indiako Ozeanotik zetorren aire hezea oztopatzen baitzuen. Horrez gain, Tibet altxatzeak neguko montzoi lehorra sorrarazi zuen, kontinentearen barrualdetik ozeanorantz jotzen duen montzoia. Horrek loess-estratu lodien higadura eolikoari eta sedimentazioari lagundu zien Txinako Ibai Horiaren mesetan. Hain zuzen, loess-en kronologia estratigrafikoak erakusten du montzoi-sistema -gaur ezagutzen dugunaren antzekoa- orduan hasi zela funtzionatzen.

Bestalde, Tibet altxatzean, izotzez estalitako eremuak hedatu ziren mesetan bertan eta Himalaian, eta horrek handitu egin zuen planetaren albedoa. Gaur egun, hango klima idorra dela eta -urteko prezipitazioa 100 mm eta 600 mm arteko da-, mesetarn %4 bakarrik dago izotzez estalita. Baliteke izotzak eremu zabala goa estaldi izana garai hotzagoetan eta ez hain idorretan, baina ez dirudi sekula -ezta Kuaternarioko glaziazioetan ere- estalki glaziar batekin estalita egon denik, orain dela gutxi arte uste zen bezala. Posibleagoa da Tibeten emertsioak hodeiak ugaritzea eskualde osoan, eta horrek ere -benetan gertatu baldin bazen- klima hozten lagunduko zuen. Azkenik, Tibet altxatzeak oztopoa jarri zion latitude ertainen inguruan zebiltzan mendebaldeko haizeen ibilbideari. Horren ondorioz, haize haien fluxu-uhinen anplitudea handitu, eta klima aldakorragoa bihurtu zen Ipar hemisferioko zerrenda epel osoan.

Mediterraneoa lehortzea

Tertziarioaren hasieran, duela 60 bat milioi urte, itsasoaren mailak egungoa baino altuagoa izaten jarraitzen zuen, eta egungo kontinenteen eremu handiak estaltzen zituen sakonera txikiko urekin. Tetis itsaso zabal eta irekiak -Mediterranoaren aurrekoak- Europako eta Afrikaren iparraldeko eremu zabalak zeuzkan urpean. Europa uhartedi bat zen, eta hango sakonera txikiko itsasoetan kareharrizko eta koral-harrizko ohiko metaketak eratu ziren.

Tertziarioan zehar, Tetis itsasoa estutuz joan zen ekialdetik, Indiako Ozeanotik bereizi arte. Hala, ozeano irekitik ia erabat banatutako itsas arro zabal bat eratu zen. Itsaso berri hark Mediterraneoa, Itsaso Beltza eta Kaspiar Itsasoa hartzen zituen bere baitan. Gero, mugimendu ororeniko alpinoak bereizi egin zituen Itsaso Beltza eta Kaspiar Itsasoa, eta barruko itsaso bilakatu ziren.

Mediterraneoa, berriz, Ozeano Atlantikoarekin lotuta jarraitu zuen mendebaldetik. Baina uren trukea ez zen egin Gibraltar itsasartetik, baizik eta egun urgaineratuta dauden eremuetatik: korridore Betikoa iparraldean (Andaluzia) eta Rif-eko korridorea hegoaldean (Maroko).

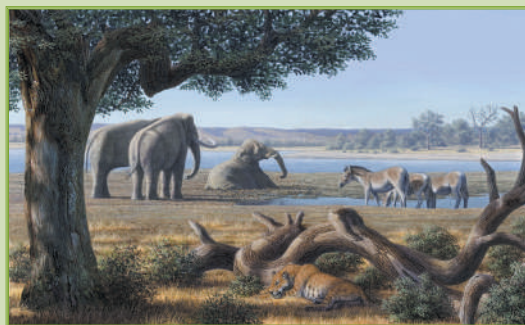
Baina duela 6 eta 5 milioi urte bitartean gutxi gorabehera, Messiniar estaiaren, Mediterraneoa lehortu egin zen zenbait aldiz. Izan ere, Atlantikoarekin zeukan lotura hain mugatua izatera iritsi zen, ezen, milaka urte gutxi batzuetako ziklotan, ireki eta gutxitu itxi baitzen behin eta berriz. Mendebaldeko eskualdean izandako mugimendu geodinamikoek eragin zuten isolamendu hura.

Beharbada, itsas mailaren igoera eta jaitsiera glazio-eustatikoek ere lagunduko zioten, hein batean, fenomeno hari. Igoera eta jaitsiera haiek Antartikako eta Groenlandiako izotzaren bolumenean izandako aldaketekin zeuden lotuta.

Egiatzatu da, halaber, ziklo orbitalek -ekinozioen preziesioarenak, adibidez- eragindako klima-aldaketek lehorte latz bezain luzeak eragin zituztela Mediterraneoko arroan, garai hartan. Lehorte haiek eragina izan zuten itsasoa osatzen zuten eta sedimentu gazi lodiak metatzen ziren arro txikien lehorte- eta betetze-erritmoetan.

1970eko abuztuan jo zuten goia Mediterranearen lehorteari buruzko ikerketek, Glomar Challenger ontzi ozeanografikoak Mediterraneon zulaketak egin zituenean. Haala, gaur egun 3.000 metrotik gorako ur-geruzarekin estalita dauden itsas arroetako hondoetan, ebaporita arrozkazko estratu lodiak aurkitu ziren (igeltsuak eta anhidritak, dibidez), baita lurrunketa handia jasandako antzinako aintziretan ohikoak ziren fosil batzuk ere.

Mediterranearen hondo lehortua oraingo azaleko maila baino ehunka metro beherago zegoen orduan. Dirudienez, Nilo ibaia-



ren arroko sedimentuen azterketek ere hori frogatzen dute. Chumakov geologo errusiarrak aurkitu zuen arro berrieneko sedimentuen azpian beste sedimentu-mota batzuk zeudela, gaur egun baino 1.500 metro beherago zegoen antzinako itsasadar zahar eta estu bati zegozkionak. Chumakov-ek dioenez, Mediterraneoa lehortuz joan zen eran. Nilo ibaia ibar sakon bat zulatu zuen, bere malda itsasoaren beherakada

progresiboari egokitzeko.

Ehunka milaka urtez, Mediterranearen hondo ia guztiz lehortuak erdi-basamortua emango zuen, han-hemen barreiatutako ur gaziko aintzira batzuekin. Ibaiek, berriz, arroila sakon batzuetan zehar egingo zuten bidea, aintzira haietara iritsi arte. Aintzira haietako hondar-urak hain gaziak ziren, ezen itsas animalien bizia oztopatzen baitzuten. Ez dakigu zehazki zer lehorte-maila izan zuen, baina sedimentu gaziak 2 eta 3 kilometro lodi izatera iritsi ziren toki batzuetan. Ezin da ulertu halako lodiera, ez bada ozeanotik bata bestearen ondoren sartutako eta lurrundutako ur gaziko inbasioengatik. Gaur egun Gibraltar itxiko balitz, Mediterraneoa osoki lurruntzek 1.000 urte inguru joko luke, eta haren hondoan 70 metro lodiko gatz-sedimentua eratuko litzateke Beraz, Messiniarreko gertaerako 2 edo 3 kilometro sedimentuak metatzeko, 30 edo 40 betetze- eta lehorte-ziklo beharko ziren.

Seguruenik, Mediterraneoa lehorteak eragin handia izango zuen kliman, ez soilik Europan, baizik baita hemisferioan ere. Mediterranearen hondoko hainbat gunetan gelditu ziren gatz-sedimentu lodiek nabarmen aldatu zuten ozeano guztien gatz-tasun-maila (milako 2 inguru gutxitu zela pentsatzen da). Gatz-krisi mediterraneo edo Messiniarrekoa deitu zaio horri. Mundu osoko ozeanoen gatz-tasun-maila jaitsi izanak, jakina, izango zuen eragina ozeanoetako zirkulazioan; izan ere, Mediterraneotik datozen ur gazien ekarpenek eginkizun zehatz eta garrantzitsua dute, dentsitate desberdina izateagatik.

Baliteke, era berean, ozeanoen gatz-tasun-mailaren jaitsiera goi-latitudeetan nabaritzea, eta, itsasoko uraren izozte-puntua igotzean, errazago izoztu izana Artikoaren azala eta izotz ugarirago bildu izana han.

Messiniarra Miozenoaren eta Pliozenoaren arteko mugan amaitu zen hain justu, duela 5,4 milioi urte inguru. Orduan, Mediterranearen mendebaldeko muturrean izandako beste



kataklismo orogeniko batek berriz ireki zuen Atlantikorako atea, oraingo honetan, Gibraltartetik. Harrezkero, Mediterraneoan orekan dago, Atlantikotik sartzen diren azaleko urei esker. Izan ere, ur horiek orekatzen dute Mediterraneoan gertatzen den ur-defizit bikoitza: batetik, arroak jasaten duen lurrunketa handiagatik -prezipitazioak baino handiagoa- sortutakoa eta, bestetik, Gibraltarreko itsasartearen ur sakonetatik ozeanora joaten den ur gazi eta lodia galtzeak eragindakoa.

PLIOZENOKO KLIMA BEROA

Tertziarioa Pliozenoan amaitu zen, eta duela 5,4 milioi urtetik 2,5 milioi urtera iraun zuen. Pliozenoko klima oraingoa baino askoz beroagoa izan zen, oro har. Hori adierazten dute polenei, lurreko animalien fosilei eta itsas foraminiferoei buruz egindako azterketek.

Pliozenoaren hasieran -duela 5 eta 4 milioi urte bitartean-, miozenoaren bigarren partean izandako hozte-aldia indarra galduz joan zen. Hala, joera termikoa alderantzikatu egin zen, eta Erdi Pliozenoan -duela 4 milioi urtetik 3 milioi urtera- batez besteko tenperatura globala gaur egungoa baino 3 °C inguru altuagoa zela pentsatzen da. Duela 3,3 milioi urtetik duela 3 milioi urtera igarotako 300.000 urteko tarte bereziari "*Erdi Pliozenoko Optimo Klimatikoa*" deitzen zaio. Koralezko atoloietan eta kostaldeko terrazetan egindako azterketek adierazten dute itsasoan maila gaur egun baino 30 bat metro gorago zegoela, Antartikan eta Groenlandian metatutako izotz-bolumen txikiagoagatik. Udaro erabat urtzen zen Ozeano Artikoko bankisa. Garain hartan, koniferoen basoak ere hazten ziren Groenlandiaren iparraldeko kostaldean, aurkitutako zuhaitz-fosilen aztarnak adierazten dutenez. Bestalde, Antartikaren inguruan metatutako diatomeo-fosilen banaketari buruz egindako azterketatik ondorioztatu da, neguan, itsasoko bankisaren nedadura gaur egun baino dezente txikiagoa zela.

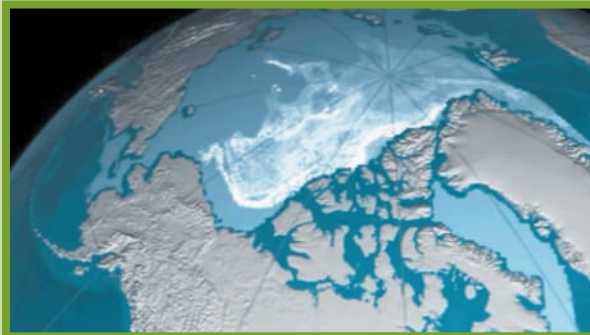
Mediterraneoko klima, berriz, beroagoa zen: tenperatura gaur egungoa baino 5 °C altuagoa zen neguan eta urteko batez besteko prezipitazioak 400-1.000 mm handiagoak zireen gaur egun baino.

Ez ditugu ongi ezagutzen Pliozenoaren erdialdeko klima bero haren motiboak, nahiz eta uste den itsas zirkulazio indartsu batek -azalekoa eta termohalinoa zenak- eusten ziola, bai Ozeano Barean, bai Ozeano Atlantikoan.

El niño gehiago?

Ozeano Bare tropikalaren alde banatan egindako foraminifero-azterketek emaitza kontraesankorrak ematen dituzte. Paradoxikoki, zenbaiten ustez, garai bero hartan La Niñaren ezaugarriak ziren nagusi: haize alisio indartsuak eta ur hotz kantitate handiak azaleratzea ekialdeko eremuan.

Baina alkenonek adierazitako datu termometrikoek kontrakoa adierazten dute, eta badirudi beste teoria hau ziurragoa dela: El Niño egoera ia iraunkorra zen, hau da, desberdintasun termino txikiak zeuden ozeano tropilaren mendebaldearen eta ekialdea-



ren artean. Gaur egun, Pazifikoko Ekuatorialaren mendebaldeko zatiko -Asia aldeko- urek 29 °C inguruko tenperatura dute gainazalean batez beste, baina Amerika aldeko zatian -ekialdean- batez besteko tenperatura 23 °C-koa da bakarrik, itsasoaren sakoneratik datozen urak azaleratzen direlako. Itxura denez, Pliozenoan, Pazifikoko Ekuatorialeko ekialdeko zati horretako ur beroko gainazaleko geruzak ur hotzak azaleratzea galarazten zuen. Hala, gaur egun El Niño fenomenoarekin noizean behin sortzen den egoera zen nagusi orduan, modu iraunkorrean.

Panamako istmoa ixtea eta Artikoa izoztea

Itsaslasterren aldaketa garrantzitsuena Pliozenoaren amaieran gertatu zen, Ozeano Atlantikoak eta Ozeano Bareak Erdialdeko

Amerikatik zeukaten komunikazioa erabat itxi zenean. Itxiera geologiko hura prozesu gradualea izan zen. Duela 13 milioi urte hasi eta, agian, duela 4 milioi urte arte iraun zuen, hau da, bi Amerikak -iparraldea eta hegoaldea- batu, eta lehorreko ugaztuenak bi norabideetan emigratzen hasi ziren arte.

Itxierak berehalako eragina izan zuen ozeanoetan, eta, ziurrenik, Ipar Atlantikoko klima aldatu zuen, harantz bideratu baitzen itsaslaster ekuatorialaren ur-masa guztia, Golkoko itsaslastera indartzen zuela.

Teoria baten arabera, Golkoko itsaslasterrek garraiatutako ur beroak lagungarri izan ziren, paradoxikoa baditudi ere, Ipar hemisferioko goi-latituetan glaziazioak has zitezen. Nahiz eta berez pentsa litekeen iparraldera ur tropikalak garraiatzeak glaziazioaren aurkakoa eragin behar zuela, baliteke Ipar Amerikako eta Iparraldeko Europako izotz-estalki handiak sorrarazi izana.

Teoria horren arabera, Ipar Atlantikoko tenperatura igotzeak lurrunketa areagotu zuen. Hala, askoz hezeago bihurtu ziren latitude ertainetako mendebaldeko haizeek Eurasia barrurantz zekartzaten aire-masa atlantikoak.

Beraz, prezipitazioak ugartu egin ziren Siberian, eta, horrekin batera, baita Artikoa itsasoratzen diren Siberiako ibaien emaria ere. Ur gezaren emaria handitzean, ozeano polarreko uraren gazitasunak behera egin zuen eta, ondorioz, erazagoa zen izoztea, ur gezak ez baititu behar ur gaziak bezain tenpeatura baxuak

izozteko. Feedback-efektu positibo baten eraginez, Ozeano Artikoko azaleko uren izozteak albedoa handitu zuen askuakde oso zabal batean, eta gainera, ozeanoa atmosferarekiko isolatu, eta uretatik airerako bero-transferentzia murriztu egin zen.

Bering itsasartea irekitzea izan zen, beharbada, Ozeano Artikoko uren beste gezagarri handi bat, Ozeano Bareko ur gezagoa sartu baitzen handik Ozeano Artikora. Inguru hartako sedimentuak aztertu ondoren, ondorioztatu da itsasartea duela 5 milioi urte inguru ireki zela lehen aldiz, Beringiaren hondoratze tektonikoa gertatu zenean. Artikoa izizteari buruzko teoria konplexuago batek dio, istmoa itxi baino lehen, Golkoko itsaslastera gehiago barneratzen zela Artikoa istmoa itxi ondoren baino. Hala, Ozeano Artikoa urtuta egoten zen, udan bederen. Dirudienez, Panamako istmoa artean irekita zegoenean, Atlantikoko itsaslaster ekuatorialaren ur oso gaziko emariaren parte handi bat Ozeano Barera joaten zen, iparraldera joan beharrean. Ondorioz, Golkoko itsaslasterreko eta Jito iparratlantikoko uren gazitasuna eta dentsitatea ez zen hain handia, eta horrek Artikoa bamera zedin laguntzen zen. Baina istmoa ixtean, itsaslasteraren emariaren jatorri tropikala handitu zen, eta, harekin batera, emariaren gazitasuna. Harrezkero, ur-masa gazi eta dentso hori are dentsuago bihurtzen da iparralderantz egin, eta hozten denean, eta, ondorioz, hondoratu egiten da Artikoa sartu baino lehen.

Baina teoria horrek badu ahulgune bat: itxiraz, Panamako istmoa Artikoa izoztu baino dezente lehenago itxi zen (duela 4 milioi urte). Itxura batean, zenbait eredu ez dute adierazten Panamako istmoaren itxiera izan zela kausa, kontrakoa baizik; hau da, Artikoa beste arrazoi batzuegatik izoztu zela, eta izozteak itxiera hark zekarren oztipoa gaingindu behar izan zuela.

Ekialdeko Afrikaren idortzea

Ekialdeko Afrikako klima idortzea da Pliozenoko beste klimaldaketa garrantzitsu bat. Ondorioz, aldaketa handiak izan ziren paisaia -sabanak zabalagoak egin ziren- eta fauna -bobidoak ugaltu ziren-. Behar bada, aldaketa haiek hominidoen eboluzioa bizkortuko zuten.

Periodo idor eta hotzak Miozenoaren amaieran hasi ziren, eta are nabarmenagoak izan ziren duela 2,8 milioi urte ingurutik aurrera.



Diotenez, Indiako Ozeanoko urak hoztearekin lotura izan dezakete periodo haiek. Indonesian sortutako uharte berriek (Timor esaterako) eta Ginea Berria iparralderatz lerratzeak eragin zezaketen hozte hura. Izan ere, mugimendu horiek bidea itxi bide zioten Ozeano Bareko itsaslaster hegoekuatorkialak zekarren ur beroari, eta Ozeano Bareko itsaslaster iparrekuatorialak zekarren ur hotza nagusituko zen. Bestalde, itsaslasteren aldaketen ondorioz Indiako Ozeanoa hozteak dezente aldatuko zuen atmosferako zirkulazioa eta eskualde hartako airearen gaitasun higrometrikoa, eta, hain zuzen, horregatik areagotu zen Ekialdeko Afrikako idortasuna.

Teoria berriago baten batera, eskualdeko altxatze teknikoak eragin zuen idortzea, mugimendu horiek gertatzen, haizeak berrantolatatu zirelako eta Indiako Ozeanotik aire heze gutxiago sartzen zelako. Ikerlari horien arabera, aldaketa topografikoaren eta haizeen norabidearen aldaketaren prozesua. Miozenoaren amaieran hasi zen (suela 8 milioi arte).

KUATERNARIORAKO TRANTSIZIOA

Erdi Pliozenoko tarte bero haren ondotik, hotzaren azken bultza da etorri zen. Elkarren segidako periodo hotz eta laburretan, izotza hasi zen metatzen Amerikako iparraldean eta Europako iparraldean, eta icebergak agertu ziren Ipar Atlantikoan. Klima aldakorra bihurtu zen, Milankovic-en ziklo astronomikoei eta, bereziki, ardatzaren zeharatasunaren aldaketa-zikloek -41.000 urte ingurukoak- lagundua.

Ipar Amerikan eta Eurasian izit-estalkiak eratzeko, oso urte handiak behar ziren neguan. Golkoko itsaslasterak ere lagundu zuen horretan. Panamako istmoa ixtean indartu ondoren. Hala, uren berotasunaren ondorioz, neguko lurrunketa eta atmosferako hezetasuna areagotu ziren, eta, horri esker, elurte handiak izaten ziren Kanadan eta Eskandinavian. Gainera, neguan, Ipar Atlantikoan, aire-masa atlantikoaren -beroagoa, Golkoko itsaslasterari esker- eta kontinentetik isteten zen aire-masa oso hotzaren arteko kontrasteak ziklogenesia areagotu zuen. Ekaitz handiek sekulako elurteak eragiten zituzten, bai Kanadako eta Estatu Batuetan ipar-ekialdean bai Eskandinavian. Metatutako elurrek ongi eusten zieten udako urtzaldiei, eta baldintza astronomikoak egokiak zirenean, estalki glaziarrek hazi eta hedatu egiten ziren. Teoria ozeanografiko alternatibo berri baten



arabera, Ipar Amerikako kopntinentean izotza metatu ahal izan zen Ozeano Bareko ur subartikoetan tenperatura-aldaketa handiak izaten zirelako urtaroen arabera (soso hotzak neguan eta oso beroak udan). Uda eta udazken amaierako ur beroek eta lurrunketa handiek elurte handiak eragiten zituzten, eta Amerikako kontinentearen ipar-ekialdean izotz-estalkiak eratzen laguntzen zuten. Berriki argitaratutako hipotesi baten arabera, El Niñoren egoera iraunkorra -aurreko garaian Itsaso Bare tropikalean nagusi izan zena- huts egiten hastean hasi zen hozte globala. Azaleko ur beroak eta sakoeiko ur hotzak bereizten dituen maila (termoklina) altxatzean, Itsaso Barearen ekialdeko ur beroen geruza murriztu egingo zen, eta, ondorioz, sakoneko ur hotzagoak azaleratuko ziren, gaur egun, El Niño fenomenoak ez dagoen gertatu ohi den bezala. Eta, aldi berean, ozeano guztietako sakoneko urak hoztu egingo ziren, Ipar Atlantikoan sakoneko ur hotz gehiago zelako, zirkulazio termohalino handiagoak lagunduta.



PLEISTOZENOA (2,5 Ma-11.500 urte)

KUATERNARIOKO GLAZIAZIOAK

Kuaternarioa oso iraupen desberdineko bi periodotan banatzen da: Pleistozenoa, duela 2,5 milioi urtetik duela 11.500 urtera arte, eta Holozenoa, duela 11.500 urtetik gaur egun arte.

Ploiozenoaren amaiera eta Pleistozenoaren hasiera alde- ra, gorabeherekin bada ere, azken 50 milioi urteetan Lurrean nagusi izandako hozte orokorreko azken fase- an sartu ziren ozeanoak.

Tenperatura jada nahiko hotza izatera iritsi zen, halako molde, non goialatitudeetan elur-prezipitazioak handiak baitziren eta Ipar Amerikan eta Ipar Europan izitz-geru- za handiak metatzen hasi baitziren. Harrezkero, etenga- be bata bestearen atzetik gertatu diren glaziazio eta gla- ziazioarteek markatu dute Lurreko klima.

Kuaternarioko glaziazioetan bi izotz-estalki ikaragarri eratu ziren Ipar Amerikaren eta Ipar Europaren iparral- deko lur kontinentaletan, eta horiek batu zitzaizkien, askoz lehenago, Antartikan eta Groenlandian iraunkor- tasun handiagoarekin edo txikiagoarekin jada eratuta zeuden izotz-estalkiei. Iparraldeko izotz-estalki berri haiek -Laurenditarra eta Finoeskandinaviarra- haziz eta hegoalderantz hedatuz joan ziren. Estalkiak gehienezko bolumenera iristen zirenean, joera aldatzen zuten, eta urtu atzerakada egiten hasten, harik eta, milaka urte batzuetako aldi laburretan -glaziazioarte izenekoak-, guztiz desagertu arte.

Beraz, ezegonkortasun klimatikoa eta bat-bateko ingurumen- aldaketa handiak nagusitu ziren eta Kuaternarioan, eta ezauga- rri horiek latitude guztiei eragin zieten, neurri handiagoa edo txi- kiagoan.

Kausak

Laurenditar eta Finoeskandinaviar izotz-estalkiak eratzen haste- ko, klima orokorrak hoztu egin behar izan zuen, Ipar hemisferio- ko neguetan elur-prezipitazioak izan zitezten, euri-prezipitazioen ordez. Halaber itxaron behar izan zen zazpi milioi urte lehenago Groenlandiako estaila eratu zenean baino hotz handiagoa izan arte -goenlandia uhartea izateak lagundu egin zuen kasko pola- rra metatzen- eta Antartikan izotza metatzeko behar izan zen tenperatura baino are hotzago izan arte -35 milioi urte lehenago gertatu zen moduan-. Antartika ez bezala, Artikoaren zati han-



diena ozeano sakon bte okupatzen du, zeina, batez beste, bi edo hiru lodiera duen ur izoztuen geruza fin batez estalita baita- go. Lur lehorra Ipar polotik dezente gradu hegoaldera dago Artikoan. Hala, latitudea txikitu eta udako intsolazioa handitzean, izotza kopuru handitan metatzea askoz zailagoa izan zen Ipar hemisferioan Hego hemisferioan baino.

Köppen-en garaietatik, klimatologoek arreta berezia ipini izan diote Kanadako iparraldeko eskualdeetan gertatzen denari, in- tsolazio-aldaketa astronomikoen eragin handia baitute lur-eremu horretako kliman. Teoria paleoklimatiko tradizionalaren arabera, latitude horietako udako intsolazioan izandako aldaketen eragi- nez eratu eta urtu izan dira Laurenditar eta Finoeskandinaviar izotz-estalki handiak. Izotz-estalki horiek eratzeko, neguan elur- prezipitazio handiak egiteaz gain, batez ere, udan izotz hori ez urtzea zen garrantzitsuen. Hori dela eta, Kuaternarioko glazi- azioen jatorri astronomikoa aipatzen da, ustez, horrek eragin bai- tzuen Ipar hemisferioko goi-latitudeetako udak intsolazio txiki- koak izatea. Aukera hori justu Ploiozenoaren amaieran -duela 3 Ma inguru- hasi zen egiaztatzen, hain zuen, Lurraren ardatzaren inklinazio-balioen oszilazioa handitzen hastean. Hala, zenbait garaitan, Lurraren ardatzaren inklinazioa gaur egungoa baino dezente txikiagoa zen. Aldizka, inklinazioaren balioak txikiak zirenean eta balio haiek beste parametro astronomiko lagunga-

rri batzuekin bat egiten zutenean (orbitaren eszentrikota- sun handia eta eguzkiarekiko urruntasunik handiena Ipar hemisferioko uda-solstizioan), uda freskoak izaten ziren, eta, beraz, glaziazioak gertatzeko baldintzak sortzen ziren. James Croll eskoziarrak iradoki zituen aldaketa horiek aurrena, baina, ondoren, Milankovic serbiarrak garatu zuen teoria modu zehatzean, Ez da erraza Kuaternarioko glaziazioen erritmoaren aldizkakotasuna egiaztatzea, baina nahiko ziur esan daiteke Milankovic- en zikloek eragina izan zutela (eranskinetako batean zehatzago azaltzen dira ziklo horiek).

Horrez gain, glaziazioak hasteko, beherrazkoa zen neguko elurteak behar adina handiak izatea. Eta, horre- tarako, hezetasuna ekartzen zuten itsasoek nahiko bero egon behar zuten. Pentsatu izan da Golkoko itsaslastar nahiko aktiboak eta Ipar Atlantikoa bero samarra izateak eragin zitzaieela elurte handi haiek. Halaber, uste da Panamako istmoa ixteak funtzionamendu hori lagundu ziola. Hala ere, guztiz ere, eredu paleoklimatikoak ez dira gai oraindik Laurenditar eta Finoeskandinaviar estalkiak eratzeko behar ziren elurte handiak simulatzeko. Berriki egindako aurkikuntzen arabera, Ipar Pazifikoko eskualde subartikoak ere garrantzi handia izan zuen, agian, Ipar Amerikako izotz-metaketaren hasieran. Hala, uren estra- tifikazio luzeari esker, uda-amaieran eta udazkenean, Ozeano Barearen iparraldeko uren tenperaturak oso altuak zirela uste da, eta horrek baldintza ezin hobeak sortzen zituen elurteak gertatzeko. Diatomeo eta kokolitofooren ugaritasunari eta alkenonei buruz egindako azterketek hori adie- razten dutela ditudi.

Paisaien koloreetan izandako aldaketek ere ondorioak izan zituzten Kuaternarioko glaziazio-zikloetan, eta atzeraelikadura- eragin positibo garrantzitsua izan zuten. Arrazoi astronomikoen- gatik glaziazioak hasi ondoren, albedoa handitzeak areagotu egin zituen. Albedoa -latinez "zuritasun" esan nahi du- da espa- zioan islatu, eta Lurra berotu gabe galtzen den eguzki-argiaren ehunekoa. Glaziazio arteko garai bero eta hezeetan albedoa txi- kia da. Itsaso subartikoen gainazal urdin edo grisek eta baso borealekin estalitako goi-latitudeetako paisaia berdeek askoz albedo txikiagoa dute glaziazio-garaietan, izitx zuri distiratsuz estalitako itsaso eta lurrek edota tundra edo estepa zurixkek baino.



Periodoak

Zer aldizkakotasunekin gertatu ziren Kuaternarioko glaziazioak? Pleistozenoaren hasieran, oszilazio klimatikoek 40.000 urte inguruko ziklo periodikoak betetzen zituzten, eta uste da ziklo haiek Lurraren ardatzaren inklinazioaren aldaketa-zikloen arabe- rakoak zirela. Artean, ez diren izotz-masa oso handiak eratzen kontinenteetan.

Ondoren, duela, 1,5 milioi urte eta duela 600.000 mila urteen, ziklo haiek luzatzen hasi ziren, eta duela 600.000 urtez geroztik, glaziazio-zikloek 80.000 eta 120.000 urte arteko iraupena izan dute. Ziklo berri horien iraupena Lurraren orbitaren eszentrikota- sunaren aldaketa-periodoaren antzekoa da (100.000 urte ingu- ru). Ziklo horien iraupena ez da beti bera izaten, ustez, eszentri- kotasunaren bigarren mailako osagai batek eragindako maizta- sun-modulazioagatik, zeinak 413.000 urteko iraupena baitu.

EEMDAR GLAZIAZIOARTEA

Eemdar glaziazioarte izan zen planetak Kuaternarioan ezagutu duen azkenaurreko periodo beroa (azkenekoa egungoa da: Holozenoa). Datazorik erabilienaren arabera -eta aurrerago eztabaidatuko duguna- duela 127.000 urte amaitu zen azke- naurreko glaziazioa, eta milurteko batzuk iraun zuen glaziazio arteko kli- mako periodo bat hasi zen: Eemdarra. Periodo horrek duela 118.000 urte arte iraun zuen, eta Europan duela 106.000 urte arte luzatu zen.

Azkenaurreko glaziazioarte hari Europan ematen zaion izena Herbereetako Eem ibaitik dator, klima epeleko faunaren fosilak eta zuhaitz hostozabalen polena zeukaten sedi-



mentuak aurkitu baitziren ibai horre- tan. Uste da Eemdar periodoaren une gorenetan tenperatura globalak gaur egungoak baino 1 °C edo 2 °C altua- goak zirela. Garai hartako intsolazioa- ren eta gaur egungoaren arteko des- berdintasunak kontuan hartzen dituz- ten ereduak eta azterketa polinikoen arabera. Asiako tenperaturak gaur egun baino 4 °C altuagoak izan zitez- keen uztailleak. Salbuespena izan arren, zenbait ereduak zalantzan jar- tzen dute batez besteko tenperatura globala hain altua zenik.

Ingalaterran, non periodoari Ipswi- chtarra deitzen baitzaio, hipopotamo- en eta gaur egun eskualde tropikale- tan edo subtropikaletan bizi diren beste animalia batzuek fosil ugari aur- kitu dira. Groenlandian, berriz, izotze-

an egindako zundaketen arabera, duela 123.000 urterko tenperaturak gaur egungoak baino 5 °C altuagoak ziren. Hala, neguko izotzaren hedadura txikituz joan zen Artikoan. Ozeanoen azaleko uren tenperaturak ere gaur egungoak baino beroagoak ziren. Alkenonen eta foraminiferoen Mg/Ca ratioaren azterketatik ondorioztatu da itsaso askotako azaleko urak gaur egungoak baino 2 °C edo 3 °C beroagoak izan zirela garai haietan.

ITSASOAREN MAILARIK ALTUENA

Koral-terrazetan -Papua Ginea Berriko Huon penintsulakoetan kasu- itsasoa mailarik altuenera eta, aldi berean, izotz kontinentalak gutxienera bolu-menera iritsi ziren, duela 125.000 eta 120.000 urteen artean. Itsasoaren maila gaur egungoa 4-6 metro gorako zegoen orduan. Bi arrazoiengatik izan zitekeen hori: batetik, gaur egun Antartikako mendebaldean estaltzen duen izitx-masaren parte handi bat ez zelako orduan eta, bestetik, Groenlandia ia osorik urtu zelako -hipotesi hori oso eztabaidatua da-. Groenlandiako hegoaldean egindako Dye-3 zundaketa garai hartako izotza aurkitu zuten. Beraz, badirudi Groenlandiako izitx-estalkiak ez zuela ia aldaketarik izan. Eemdarren zati handienera itsasoak izandako maila altuak zenbait aldaketa sortu zituen kostaldeko lerroetan. Finlandiaren zati bat urpean gelditzean, litekeena da Eskandinavia uharte handi bihurtzea, eta, beraz, Baltikoa eta Artikoa elkartuta egotea. Halaber, litekeena da Ganimarkako Jutlandia istmoa uharte bihurtzea.

INTSOLAZIO DESBERDINA

Ipar hemisferioko intsolazioa gaur egundoa baino askoz ere handiagoa zen udajo hilabeteetan, eta askoz ere txikiagoa neguan. Beraz, urtaroaren arteko aldeak handiagoak ziren. Alegia uste da garai hartan Ipar hemisferioko udak beroagoak eta neguak hotzagoak zirela. Koraletan egindako zenbait azterketek hori adierazten dutela dirudi. Glaziazioarte haren aldi beroenean, Lurreko orbitaren eszentrikotasuna gaur egun baino askoz ere handiagoa zen, eta Ipar hemisferioko udan gertatzen zen perihelioa. Horregatik ziren hain handiak intsolazio-diferentziak. Lurraren ardatzaren inklinazioa ere gaur egun baino pixka bat handiagoa zen. Hiru ezau-



garri horien ondorioz, askoz ere handiagoak ziren urtaroen arteko aldean.

KLIMAREN EGONKORTASUNA

Ez dakigu Eemdar glaziazioarteak iraun zuen milurteetan nagsitu zen klima gaue egungo periodokoa -Holozenokoa- bezain egonkorra izan zen, edo aldakorragoa izan zen. Sekuentzia polinikoen azterketek -Greziako iparraldeko Ioannina aintzirako sedimentuetan egindakoek, esaterako- erakusten dute oso gutxi aldatu zela klima Eemdarrean, eta, beraz, badirudi Holozenokoaren antzekoa izan zela. Horixe bera adierazten du Frantziako mendialdeko Rinains Maar paleoaintziran sedimentatutako diatomeoen opaloaren oxigenoari buruz egindako azterketa isotopikoak, baita aztarnategi paleoklimatiko horretako sedimentuetan egindako azterketa polinikoez ere. Duela zenbait urte Groenlandiako izotzetan egindako zundaketen azterketek erakutsi zuten bat-bateko hozte-aldi handiak izan zirela glaziazioarte hartan. Baina badirudi, garai hartako izotzgeruza sakonen tolestura eta fusioen ondorioz, gaizki interpretatu zirela zundaketa horiek, eta akats horren ondorioz atera zela aipatutako ondorioa. Edonolua ere, zenbait lekutan agertutako aztarnak adierazten dute Eemdarrean hozte-aldi garrantzitsuren bat izan zela, agian. Adibidez, Bahametako koralezko arrezife baten azterketatik ondorioztatu da litekeena dela tenperatura hotzeko zenbait aldi izatea, une batez, itsasoaren maila 15 metro inguru jaitsi zela erakusten baitu. Baikal lakuaren uretako sedimentuen diatomeo-kontzentrazioaren azterketek ere hozte-aldi handiaren bat adierazten dutela dirudi.

Horrez gain, Alemaniako Eifel eskualdeko urmaelen sedimentuek osatutako urteko geruzen azterketek adierazten dute hotz eta lehorre handiko garai garrantzitsu bat izan zela Erdialdeko Europan glaziazioartearen amaieran (duela 118.000 urte). Gertaera horrek lotura izan dezake Golkoko itsaslasterratik atlantiko iparraldeko frontearen lehenengo atzeraldiarekin, 400 urte inguru iraun zuen eta hasiera eta amaiera bortitza izan zituen. Zenbaiten ustez, antzeko zerbaite gerta daiteke laster, garai hartako udako intsolazioa (416 W/m² uztaillean, 65° N latitudean) gaur egungoaren oso antzekoa baitzen (428 W/m²).

Beraz, ezin dugu seguru esan Eemdar glaziazioarteak Holozenoak bezain klima egonkorra izan zuenik bere iraunaldi. Seguruenik, glaziazioartearen (duela 127.000-118.000 urte) klima nahiko homogeneoa izan zen, baina ondoren-

go periodoan (duela 118.000-106.000 urte) -leku askotan garai beroa izan zen hura ere (Europaren hegoaldean, adibidez)- klima aldakorragoa bihurtu zen, eta, batzuetan, eguraldi hotza sartzen zen iparraldeko latitudeetatik hegoaldera, eta, bestetan, lehorteak izaten ziren.

DATU EZEZAGUN GARRANTZITSU BAT: NOIZ ETA NON HASI ZEN GLAZIAZIO ARTEA?

Eemdarren hasieraren datari buruzko eztabaida ez da husteria, oraindik ere, inork ez baitaki zergatik eta non hasi zen urtzaldia. Alegia, ez dakigu Ipar hemisferioko goi-latitudeetan edo Hego hemisferioko goi-latitudeetan hasi zen, edo, bestela, latitude tropikalak berotzeagatik gertatu ote zen. Azken aurreko glaziazioaren -II. Amaiera deitutakoaren- amaieran kronologia zehatza jakitea aurrerapen handia litzateke galdera horri erantzuteko. Eta, hain zuzen, galdera garrantzitsua da, gaur egun Lurrari eragiten dion ustezko berotze globalarekin duen antzekotasunagatik.

Lehenengo hipotesia: Ipar poloan

Teoria kanonikoaren arabera, Ipar hemisferioko udako erradiazioa handitu, eta izotz-estalkiak urtzean hasten ziren beti glaziazio arteko periodoak. Lurraren mugimenduekin lotutako kalkulu astronomikoei esker, badakigu Ipar hemisferioan udako hiletan jasotako eguzki-erradiazioa gehieneko mailara iritsi zela duela 127.000 urte. Eta uste da horrek iparraldeko izotz-estalkiak urtzea eragin zuela. Gainera, urtzaldiaren ondorioz Lurraren albedoa txikitzeak fenomeno areagotuko zuen. Hori gertatu eta berehala, oraindik ongi ulertzen ez diren ozeano-lutoren bidez, desglaziazioa hegoalderantz -latitude tropikalera eta, ondoren, Antartikara- transmititu zela uste da. Imbrie eta haren lankide batzuek foraminiferoen oxigeno-isotopoen bilakaeraren kurba 65° N latitudeko udako intsolazioaren kurbarekin -Milankovic-en teoriatik eratorria- sinkronizatu zuten; hala, azkeneko ziklo glaziarren datazioari buruzko SPECMAP (Spectral Mapping Time Scale) eskala lortu zuten, eta, dirudie-nez, horrek berresten du aipatutako teoria.

Bigarren hipotesia: Hego poloan

Ozeanoetako sedimentuen azterketa batzuen arabera, lehenago hasi zen Eemdarra: duela 135.000 urte, edo are lehenago. Halaber, Bahametako, Barbadoseko eta Huon-eko koral-terrazetan egindako datazio erradiometrikoez frogatzen dute 130.000 urte baino lehenago igo zela itsasoaren maila. Izan ere, duela 135.000 urte itsasoaren maila gaur egun baino 20 metro beherago zegoen jadanik. Nevadako Devil's Hole leizeko kareharriaren oxigeno-isotopoez

ere, itxura denez, adierazten dute duela 135.000 urte edo lehenago hasi zela Eemdarra. Leizeko kareharriaren 0 18O-aren aldaketak tokiko euri-uraren tenperaturaren arabekoak dira. Dena den, uste da Devil's Hole-ko datuek Nevadako eta Kaliforniako klima espezifikoaren aldaketak bakarrik agertzen dituztela, eta ez klima globalarenak. Baina, desglaziazioaren aurreratze hori onartuz gero, ezin da ulertu Ipar hemisferioko udako intsolazioak



sortu zuenik Eemdar glaziazioarte, zeren, garai hartan, intsolazioa txikiegia zen urtzaldia eragiteko adinako berotzea sortzeko. Beraz, badirudi Hego hemisferioko goi-latitudeetako intsolazioan egon daitekeela gakoa. Izan ere, Hego hemisferioko 65° latitudeko udako intsolazioa duela 138.000 urte iritsi zen maximora: beraz, horrek frogatzen dezake Hego hemisferioan sortu zela desglaziazioa -eta ez Ipar hemisferioan-, intsolazioak, bereziki, Antartika inguratzen duen itsasoko izotzari eragin ondoren. Hala, izotz-bankisa australa murriztean, itsasoko CO₂-a errazago helduko zen atmosferara. Horrek feedback positibo bat eragingo zuen berotzea gertatzeko, eta, ondorioz, desglaziazioa azkartu egingo zen bi hemisferioetan.

Hirugarren hipotesia: tropikoan

Hirugarren hipotesi baten arabera, II Amaieraren arrazoia eta Eemdar glaziazioartearen jatorria ez da bilatu behar iparraldean edo hegoaldean, baizik eta tropikoan edo Ozeano Bareko uren berotzean. Alde horretatik, Ozeano Bare tropikalean foraminiferoen Mg/Ca bilakaerari buruz egindako zundaketa batzuek erakusten dute itsasoaren gainazaleko aldaketa termikoen datazioa hurbilago dagoela Devil's Hole-ko datazioetatik, Milankovic-en teoriatik eratorritako datazio tradizionalatik baino. Halaber, Indonesiako ozeano-eskualde beroan, Borneoko hegoaldean, egindako zundaketa batek argi erakusten du, itxuraz, itsasoaren tenperaturaren berotzea poloak urtu baino 2.000 edo 3.000 urte lehenago gertatu zela.

Alkenoen azterketaren bidez kalkulatzeko da garai batean azaleko urek izandako tenperatura. Hala, Zeelanda Berriko kostaldean egindako zundaketa baten arabera, kostalde horretako uren batez besteko tenperatura 12 °C-tik 19,5 °C-ra igo Eemdar glaziazioartearen (gaur egun, 15 ° C inguruko tenperatura dute horiek). Zundaketa horrek eta beste zenbaitek adierazten dutenez, Ozeano Bare tropikaleko eta Ozeano Barearen hegoaldeko -eta Atlantikoaren hegoaldeko- urak Ipar hemisferioko izotz-estailak urtu baino lehen hoztu ziren. Bestalde, Ozeano Bare subtropikalean, Peruko kostaldean, alkenoen bidez egindako zundaketa baten arabera, eskualde horretan, duela 150.000 urte hasi zen igoera termikoa; Eemdarra hasi baino askoz lehenago, beraz.





AZKEN GLAZIAZIOA

IPAR HEMISFERIOAN IZANDAKO HASIERA

Orain arteko hipotesirik onartuenaren arabera, duela 115.000 urte amaitu zen Eemdarra eta hasi zen Azken Glaziazioa, Kanadaren iparraldean neguan egindako elurra udan zeharo urtu gabe irauten hasi zenean. Labradorren eta Baffin uhartean, gaur egun ere, aski litzateke tenperatura apur bat jaistea, han egindako elurrak urtu gabe irauteko urte batetik bestera. Duela 115.000 urte inguru, intsolazio-kondizioak ezin hobeak ziren hori gertatzeko. Milankovic-en zikloen arabera -planetaren orbitaren eszentrikotasunari buruzkoaren arabera bereziki-, glaziazioartean, Ipar hemisferioko goi-latitude horietan oso trantsizio azkarra gertatu zen udako intsolazio handi batetik intsolazio askoz ahulago batera. Hala, hamar milurtekotik gorako epean -125.000 eta 115.000 urteen artean- 100 W/m²-tik gora murriztu zen 65°N latitudean jasotako eguzki-erradiazioaren intentsitatea (550 W/m²-tik 440 W/m² ingurua). Duela 115.000 urte, Lurra Eguzkiaren inguruan urtero egiten duen orbitaren perihelioa -alegia, Lurra Eguzkitik hurbilen dagoen urteko garaia- neguan izaten zen Ipar hemisferioan, gaur egun bezala. Afelioa edo Lurra Eguzkitik urrutien dagoen uea, berriz, Ipar hemisferioko udan gertatzen zen. Bestalde, orbitaren eszentrikotasuna gaur egungoa baino handiagoa zen, eta ardatzaren inklinazioa, txikiagoa. Faktore horiek guztiak elkartuta, urtaroen arteko aldeak txikiagoak ziren Ipar hemisferioan gaur egun baino, hau da, intsolazioa handiagoa zen neguan, eta -garrantzitsuago dena- txikiagoa, udan.

Elurrak udako urtzaldiari aurre egin ondoren, udazkenezko lehenbiziko elurak iristean, lurra iristean, lurra baldintza egokiak zituen zuritu eta elurra metatzeko (gaur egun ez da hala gertatzen) Eluraren kolore zuria oso gainazal islatzailea sortzen zuen. Ondorioz, albedoa handitu eta xurgatutako intsolazioa murrizten zen, eta, hala, feedback-mekanismo positibo baten bidez, elurra metatuz joaten zen.

Horren gain, elurrez estalitako eskualde artikoa haletako hegoaldeko ertzetan, udak freskatzearen ondorioz, taiga-basoak degradatuz joan ziren, eta tundra-paisaia argiagoak hartu zuen haien lekua. Tundran egindako elurraren zurtasunak albedoa handitu zuen. Eta horrek hotza areagotu, eta neguko intsolazioaren hazkundea indargabetzen zuen. Zenbait paleoklimatologoren iritziz, goi-latitudeetako paisaien kolorearen aldaketa horrek

Beharbada, ozeano tropikaleko aldaketa termikoek -aldaketa astronomikoek (bereziki, orbitaren eszentrikotasuna) intsolazioaren parametro batzuetan izandako eraginagatik gertatzen ziren- itsasoaren eta atmosferaren arteko CO₂ trukea aldatzen zuten, eta, ondorioz, baita munduko klima ere. Baina, aldi berean, litekeena da zundaketen datuak oraindik oso urriak izatea eta planeta osora estrapolatzeko modukoak ez izatea da, tokiko itsas aldaketak bakarrik adieraztea.

Gradiente termikoa

Badira hipotesi sofistikatuagoak ere Eemdarren hasiera esplikatzen. Horietako baten arabera, Ipar-Hego intsolazio-gradiente txikiaren garaian -duela 140.000 urte inguru izandakoan adibidez- hezetasun-ekarpen txikiagoa gertatzen zen behe-latitudeetatik goi-latitudeetara, eta, ondorioz, neguko elur-prezipitazioak ez ziren behar adinakoak izotz-estalkiak urte osoan irauteko.



berebiziko garrantzia izan zuen glaziazioaren hasieran. Bestalde, Ozeano Artikoko itsas sedimentuek adierazten dutenaren arabera, duela 115.000 urte inguru, zirkulazio termohalino-a geratu egin zen bat-batean. Gertaera hori izotz-bankisaren hedepenearekin batera gertatu zen, eta, beraz, are gehiago lagundu zuen albedoa handitzen eta tenperatura hozten. Europako hegoaldean, berriz, klimak nahiko beroa izaten jarraitu zuen zenbait milurteko gehiagotan, harik eta iparraldean aratutako izotz-estalkietatik zetozen icebergekin batera ur polar hotzeko masa handi bat Portugalgo latitudea iritsi zen arte, duela 106.000 urte inguru. Hala, behin betiko amaitu zen Eemdar glaziazioarte eta Azken Glaziazioa hasi zen.

ETA HEGO HEMISFERIOAN?

Hau da galdera paleoklimatikorik handienetako bat: Ipar hemisferioa eta Hego hemisferioa zergatik sartu ziren ia batera Azken Glaziazioan? Izan ere, duela 115.000 urte, geometria orbitalak uda boreal freskoak eragiten zituen; baina ez zituen ondorio berak sortzen hemisferio australean, non erradiazioaren murrizketa udaberrian gertatzen, eta ez udan.

Lehenago esan bezala, Milankovic-en teoria klasikoaren arabera, Ipar hemisferioan hasi behar zuen glaziazioak. Baina Hego hemisferioko aztarnategi paleoklimatikoek erakusten dute, duela 115.000 urte inguru -beraz, ia garai berean-, han ere hotza areagotu, eta Andeen hegoaldeko, Patagoniako eta Antartika inguratzen duen izotz-bankisako glaziarrek hedatzen hasi zirela.

Oraindik ez dago oso garbi zer mekanismoaren bidez transmitti-

tu zen glaziazioa hemisferio batetik bestera. Zenbait ezaugarri adierazten dute Eemdarren amaiera markatu zuen hoztea duela 115.000 urte baino milurteko batzuk lehenago hasi zela hegoaldeko itsasoetan, Ipar hemisferioan glaziazioa hasteko kondizio egokiak sortu baino lehenago. Groenlandiako eta Antartikako izotzen neurketak alderatuta ere, ezin daiteke ondorioztatu iparraldean hegoaldean baino lehenago hasi zela glaziazioa. Azken Glaziazioaren hasierako garaiari buruz 500 urtez beheko aldiak bereiztera iristen garenean argitu ahal izango dugu bi hemisferioen arteko lotura hori.

Baldin eta glaziazioa Ipar hemisferioko goi-latitudeetan hasi bazen, baliteke ozeanoko zirkulazio termohalino-a murrizteak Antartikako hoztea eragin izana. Gaur egungoaren gisako glaziazio arteko garai beroetan Ipar Atlantikoan eratzen den ur-masa sakonaren zati handi bat (NADW, North Atlantic Deep Water) hegoaldeko itsasoetan azaleratzen da, Ozeano Atlantiko osoa itsas maila sakonetatik eta ertainetatik zeharkatu eta gero. Azaleratutako ur-masa hori hotza da, baina ez Antartikako kostaldean eratzen dena adina (AABW, Antarctic Bottom Water). Hala, kontinente austala inguratzen duen kostaldeko aire hotz-hotza leuntzen du ur-masa horrek. Ipar hemisferioan glaziazioa glaziazioa hastean, zirkulazio termohalino atlantikoa ahuldu egiten da, eta ur gutxiago azaleratzen da Antartikako kostetan. Horregatik, hegoaldeko itsasoetako ur-geruzak gehiago estratifikatzen dira, eta are gehiago hozten. Eta, azkenean, horren guztia-oren ondorioz, Antartika ere hoztu egiten da.

Hego hemisferioaren garrantzia azpimarratzen duen beste hipotesi bten arabera, Antartika inguratzen duen neguko bankisaren hedapenaz gain -airearen aldaketa termikoek eragin handia dute bankisa horretan-. uraren gazitasuna handitzean, AABW gehiago sor zitekeela uste da. Hala, ozeanoen sakoneratik Atlantikoaren iparraldera doan ur-masa oso hotz hori Ipar Atlantikora heltzean, uraren egonkortasun bertikala handitu, eta hango NADW uren ekoizpena murriztu eta zirkulazio termohalino-a geratuko zen, eta, horren hoztea aerogotuko zuen, hipotesi hori defendatzen dutenen arabera.

BEROTEGI-GASEN EGINKIZUNA

Eskala globalean berotegi-gasak (karbono dioxidoa, metanoa eta lurrina) gutxitzeak ere glaziazioa areagotu eta hotza hemisferio australera transmititzen lagun zezakeela uste da.



Groenlandia eta Antartika estaltzen dituzten izotz-geruzen burbuletan harrapatu airean analisiari esker, azken glaziazio-zikloetan berotegi-gas eta aerosol atmosferiko batzuen kontzentrazioa nola joan zen aldatzen jakin ahal izan dugu. Hori jakitea ezinbestekoa da, bereziki, azken glaziazio-zikloari dagokionez (orain dela 130.000 urtetik gaue egun arte). Gas horien kkontzentrazioan izandako aldaketen analisiak informazio asko ematen digu periodo horretako klima globalaren bilakaerari buruz.

Karbono dioxidoa

Izotzek adierazten dutenez, Eemdar glaziazioartetik (duela 125.000 urtetik) Azken Maximo Glaziarrena (duela 22.000 urtera) bitarteko aldian, CO₂-aren kontzentrazioa 300 ppm-tik 200 ppm ingurura jaitsi zen. Gero, azken desglaziazioan, igo egin zen berrira, eta Holozenoaren hasieran (duela 11.500 urte inguru) 280 ppm-raino iritsi zen. 1750. urtearen inguruan hasitako industria-aroaren ondoren, igo egin zen berriz ere, eta dagoeneko 380 ppm-ko mailara iritsi da, gutxi gorabehera.

Azken Glaziazioan CO₂-aren kontzentrazioaren jaitsiera ez zen uniforme izan; Dansgaard berotze-gertaera batzuen ondoren, 20 ppm inguru igo zen, eta, gero, berrira jaitsi egin zen. Antartikako Taylor dome estazioko izotzetan harrapatutako CO₂-aren bilakaeraren analisi zehatzek lau aldi argi bereizten dituzten duela 70.000 urte eta 20.000 urteen artean, zeinetan CO₂-aren kontzentrazioa handitu eta tenperatura igo egin baitzen.

Zer erlazio zegoen CO₂-aren bilakaeraren eta tenperatura bilakaeraren artean?

Tenperatura bilakaera eta CO₂-aren kontzentrazioen bilakaera konparatzen baditugu, ikusiko dugu tenperatura-aldaketak ia beti CO₂-aren aldaketen aurretik gertatzen direla. Hala, Azken Glaziazioaren hasieran eta Eemdarren amaieran, tenperaturen jaitsiera CO₂-aren kontzentrazioaren jaitsiera baino askoz ere azkarragoa izan zen. CO₂-aren kontzentrazioa altua izaten segitu zuen milaka urte batzuetan, nahiz eta ordurako hotza nabarmetzen hasia zen. Beraz, Groenlandiako eta Antartikako izotzetan harrapatutako aire-burbuilien arabera, azken 150.000 urteetako tenperaturen bilakaeraren kurba CO₂-aren kontzentrazioaren bilakaeraren antzekoa da, baina alde eta desfase garrantzitsuekin.

Eemdarren eta Azken Maximo Glaziarren arteko CO₂-aren kontzentrazioaren diferentzia 80 ppm-koa izan zen, baina alde hori ez da nahikoa, berez, tenperatura-diferentziak azaltzeko. CO₂-aren kontzentrazio atmosferikoaren 80 ppm-ko diferentzia horrek 2,4 W/m² inguru handiaraziko zuen gainazaleko erradiazioa, eta teorikoki, horrek 0,7

°C-ko tenperatura-aldaketa ekarriko zuen soilik, bes-telako feedback-efektu erantsirik gabe (adibidez, albedoa handitzea izotz-estalkien eraginez). Hala eta guztiz ere, Azken Glaziazio-ko batez besteko tenperatura gaur egungoa baino 7 °C inguru baxuagoa zen. CO₂-aren kontzentrazioa aldatuz intsolazioa egonkor mantentzen duten eredu informatikoez ere gauza bera adierazten dute, hau da glaziazio-zikloak eta glaziazio arteko zikloak ezin direla azaldu CO₂-aren kontzentrazio atmosferikoaren aldaketan bidez, aldaketa horiek eragin handia izan arren. Shackleton-en arabera, CO₂-aren kontzentrazioa 80 ppm inguru txikitu izanak eragin handiagoa izan zuen maila globalean, eskualde artikoetan albedoa handitzean sortutako feedback-efektuak baino. Itsasoko mantengutia hobetzeari esker -bereziki haizeek kontinenteetatik zekarten burdina-, planktonaren fotosintesia areagotu egin zen, eta, horren ondorioz, ozeanoek CO₂ gehiago biltzen zuten eta atmosferako CO₂-kontzentrazioa murriztu egin zen. Hala eta guztiz ere, azken glaziazio-zikloko produktibitate biologikoari buruz berriki egindako hainbat itsas zundaketen arabera, ponpaketa biologikoak CO₂-aren 80 ppm-ko murrizketa atmosferikoaren erdia bakarrik esplika dezake. Horrez gain, baliteke itsasotik airerako aireztatapen maila eta CO₂-aren garraioa murriztea -batez ere, Antartika inguratzen duten itsasoetan -itsasoko izotz-bankisa handitzearen eta urak estratifikatzearen eraginez. CO₂ atmosferikoa murriztu egiten zen glaziazioetan. Baina zergatik? Agian, atmosferaren eta ozeanoen arteko CO₂-trukeak aldatu egiten zirelako.

Glaziazioetan jarduera fitoplanktonikoa handiagoa zela uste da. Hala, karbonoaren ponpaketa biologiko handiagoa egiten zen itsas hondorantz, eta horrek CO₂ atmosferikoaren kontzentrazioa txikitzea ekarri zuen. Dena den, oraindik galdera asko daude erantzun gabe. Teoria horren arabera, glaziazioetan jarduera planktonikoa handiagoa zen kontinenteetatik zetozen haize indartsuek itsasora eramandako haausari esker. Klima lehorragoa zenez, haize haiek landaretzarik gabeko eremuak -gaur egungoak baino zabalagoak- bipiltzen zituzten, eta burdina askoko hautspartikula, gehiago altxatu eta eramaten zituzten itsasora. Oraindik ez da adostasunik lortu burdinak itsas produktibitate globalean duen eraginari buruz, mantengutia kontzentrazioa oso ezberdina baita itsaso batzuetan eta besteetan. Baina, behar bada, ozeanoen gainazalera burdina gehiago iristean CO₂ atmosferikoa ozeanoetan gehiago finkatuko zen, eta CO₂-ak atmosferan zuen kontzentrazioa murriztu.



Ikertzaile batzuen ustez, desnitrifikazioa moteltzeak garrantzi handiagoa izan zuen itsas fotosintesia areagotzeko prozesuan, burdin ekarpenak baino. Desnitrifikazioa nitrogenoaren finkapenaren kontrako prozesua da, hau da, nitrogenoa uretatik airera eramateko prozesua. Hala, uretan nitrato ioi disolbatu gisa egotetik, airean gas-molekula gisa egotera pasatzen da nitrogenoa. Oxigeno gutxiko uretan eta ozeanoen hondoetan egoten diren bakterio jakin batzuk egiten dute prozesu hori. Desnitrifikazioa negatiboa da produktibitate biologikoarentzat, nitrogeno disolbatua -planktonaren funtsezko mantengutia- kentzen baitio urari. Dirudenez, glaziazioan desnitrifikazioaren intentsitatea murriztu egin zen, eta, ondorioz, nitratoen erabilgarritasuna, produkzio biologikoa eta CO₂-aren finkapen fotosintetikoa handiagoak ziren urtean.

Bestalde, neguan baunkisa polar australa hedatzean, itsasoaren eta atmosferaren arteko komunikazioa murrizten zen, eta, ondorioz, urak gutxiago aireztatuta zeudenez, Azken Glaziazio-ko CO₂ atmosferikoaren murrizketaren zati bat horrek eragin zuela uste da. Itsasoko izotz-estalkiak ur polarren eremu zabal bati -gaur egun, CO₂-tan aberatsa den tarteko urmasa hotz bat azaleratzen da eremu bati- eragin ziola pentsatzen da. Haizeak CO₂-aren kontzentrazio atmosferikoan duen eraginari dagokionez, berriz, kontraesan teoriko bat dago. Batetik, glaziazioan zehar haizearen intentsitatea handituz gero -bereziki alioena-, ur hotz, tarteko ur edo hondoko ur gehiago azaleratuko ziren zona tropikaletan, eta, bereziki, zona horren ekialdeko kostaldeetan. Eta u hotz haiek azaleratzean, CO₂ gehiago joango zen itsasotik atmosferara. Baina, bestetik, azaleratze handiagoari esker, mantengutia gehiago igoko ziren gainazalera, eta horrek bizi fitoplanktonikoa eta ponpaketa biologikoa -hau da, CO₂-aren garraioa atmosferatik itsasora areagotu zituen. Ez da erraza elkarren kontrako bi efektu horietatik, garai hartan, zein nagusitu zen erabakitzea.

Metanoa

Groenlandiako eta Antartikako izotzetan harrapatutako aire-burbuilak aztertuz jakin ahal izan da, azken 150.000 urteetan, metanoaren kontzentrazio atmosferikoa aldatuz joan dela planetako batez besteko tenperaturaren bilakaerarekin oso paretsu. Hala, garai beroetan asko hazten da metanoaren kontzentrazioa, eta hotzetan, berriz murriz-

tu. Metano-kontzentrazioaren aldaketek aldaketa termikoezko duten desfasea askoz ere txikiagoa da karbono dioxidoaren kasuan baino.

Hotzaren eta permafrost edo lurzoru izotzuen hedapenaren eraginez, goi-latitudeetako padura-eremuak eta zohikaztegiak txikitu eta jarduera bioogikoa murriztu zen, eta, ondorioz, berotegi-gas garrantzitsua den metanoaren emisioek beherakada handia izan zuten. Halaber, litekeena da itsas zorupeko hidrato izoztuetatik zetozen metano-emisioak ere gutxitu izana. Azken Maximo Glaziarrean metanoak 0,35 ppm-ko kontzentrazioa zuen gutxi gorabehera, Holozenoaren hasieran lortu zuen 0,70 ppm-ko mailaren ez.

Batez ere, hezeguneen hondoko materia organikoaren hartxidura anaerobikoaren ondorioz sortzen da metanoa. Behin atmosferara iritsita, nahiko azkar suntsitzen da oxidazio bidez. Metano-molekula batek 12 urte bakarrik irauten du atmosferan, batez betse. Horregatik, kontzentrazio atmosferikoak berehala erantzuten dio Lurreko emisioen intentsitateari. Hala, emisio horiek murrizten badira, kontzentrazioa oso denbora gutxian murrizten da, eta alderantziz. Aldaketak ia aldi berean gertatzen dira eskala globalean, airearen zirkulazio globalaren eraginez, metano-molekulak berehala zabaltzen baitira troposfera osoan. Teoria tradizionalaren arabera, Ipar hemisferioko montzoi tropikalen indarrarekin lotutako fluktuazioak azaltzen ditu metanoak Azken Glaziazioan izandako bilakaerak. Montzoi indartsuenek hezeguneak sortzen dituzte Afrikako eta Asiako eskualde batzuetan. Glaziazioetan eremu erdiidorrak bihurtzen dira hezegune horiek, eta horrek gas metanoaren iturri bihurtzen ditu, aldi baterako. Aldiz, montzoi ahulagoak idortasuna, eta metano gutxiago produzitzea eragiten dute, eta, ondorioz, metanoaren kontzentrazio atmosferikoa murriztu egiten zen denbora gutxian. Beraz, esan liteke ezen zenbat eta handiagoa izan Lurraren azaleko beroa eta hezetasuna, orduan eta handiagoak direla atmosfera isuritako metano-emisio biologikoak ere. Hori gertatutakoan, metanogenesia handitzen da, bakterio-jarduera handiagoaren ondorioz. Beraz, uste da periodo hotzagoek ekarritako hotzak eta lehortasunak metano-emisioak murrizten dituztela. Hala ere, paradoxikoa dirudien arren, Azken Maximo Glaziarrean are gehiago hedatu ziren eremu batzuetako hezeguneak. Adibidez, zenbait kostaldean oso erliebe lau-ko plataforma konti-



nentlak azaleratzean, hezegune handiak eratu zireen, bereziki, Beringian, Indonesiako eta Ginea Berriko Sonda itsasoan eta Ipar Amerikako eta Hego Amerikako kostaldeetan. Bestalde, zenbait laku subtropikalen maila jaistean, laku haiek ere hezegune eta padura bihurtu ziren, eta, beraz, haien hondoetan eraturako metanoa atmosferara joaten zen uraren sakonera txikiari esker. Aldiz, garai euritsuenetan, metanoa sortzen zuten padura-eremu batzuk laku sakonagoak bihurtzen ziren, eta laku haien hondoetan sortutako metano-burbuilak beste bakterio metanotrofiko batzuk kontsumitzen zituzten, atmosferara irteen baino lehen. Horrek aurkako efektua -hau da, emisioak gutxitzea, garai beroagoetan lehortek hezeguneak erabat idortzen zituenean gertatzen zena- indargabetzen zuen, neurri batean. Beraz, eredu berriak ez datoz bat teoria tradizionalarekin, zeinaren arabera erlazio zuzena baitago euri kopuruaren eta metano-emisioen artean.

Izan ere, ziurrenik, kondizio tropikalen aldaketak ez dira metanoaren produkzio naturalak dituen aldaketen eragile bakarrak, ezta nagusiak ere. Hala, kontuan izan behar da goi-latitudeetako tundra-eremuetan eta Artikoko kostaldeko plataformetan gertatzen dena ere. Hain zuzen, Dansgaard-Oeschger periodoen fluktuazioetan, metano atmosferikoaren kontzentrazio-aldaketak goi-latitudeetako aldaketa haietatik datozela dirudi, eta ez montzoi tropikalen aldaketetatik. Garai beroetan, metanoa ekoizten zuten padurak hedatuko zirela pentsatzen da, lehen permafrost-en eraginpean zeuden eskualdeetako izotzak urtzearen eraginez. Ondorio hori atera da Groenlandiako zundaketa batzuetako

NH₄amonio ioien kontzentrazioaren aldaketetatik ere. Metanoarekin gertatzen den antzera, NH₄ ioien kopurua handitu egiten da garai beroetan; izan ere, lurzoruen jarduera biologikoak produzitzen ditu ioi horiek, eta jarduera hori areagotu egiten da tenperatura igo ahala. Baina ioi horiek oso gutxi irauten dute atmosferan (hamar egun besterik ez). Hortaz, Groenlandia jalkitako ioien iturriak hurbilekoa izan behar du, eta ezin da tropikala izan. Hori dela eta, badirudi goi-latitudeetako hezeguneak estadia arteko periodo beroetan hedatu zirela, eta uste da horrek metanoarenean kontzentrazio atmosferikoa handituko zuela. Halaber, litekeena da, ura berotzean, Artikoko urperatutako plataformen itsas hondoa desegonkortzea eta klatratoak (metano izoztua) urtzea, eta, ondorioz, metanoak ihes egitea.

Lurruna

Hotzaren ondorioz aireak gaitasun higrometrikotxiagoa zuenez, atmosferako lurruna gutxitu



egingo zen, eta horrek ee feedback-efektu garrantzitsua eragingo zuen tenperatura hozteko orduan. Kontuan izan behar da eskualde subtropikaletan -zeinak glaziazioan erdiior izatetik idor izatera pasatu baitziren- lurrunaren kontzentrazio absolutua % 0,1etik % 0,01era jaitsi bazen, Lurretik irteten den energia infragorriaren fluxuaren atxikipena 26 W/m² murriztuko zela. Horregatik, zenbait adituren ustez, tropikoko hezetasun-aldaketetan dago klima-aldaketak planeta osora hedatu izanaren giltza nagusia. Ez da erraza murizketak global hori zehazta, lurruna ez baita homogeneoki banatzen troposferan. Hala ere, kalkuluen arabera, tropikoko atmosferaren beheko mailan -0 km-tik 3 Km-ta-, gaur egun baino % 20 txikiagoa zen lurrunaren kontzentrazioa, eta, Andeetako izotzetan egindako behaketen arabera, goi-mendietan % 50 txikiagoa zela uste da. Lurrun-kontzentrazioaren alde horiek aski izango lirarteke, berez, tenperatura 3 °C edo 4 °C jaitsi izana azaltzeko. Bukatzeko, landaretzaren etabasoan -eta, beraz, isoprenoen eta monoterpenoen (KOL, konposatu organikoen lurrunak; ingelesez, VOC, Volatile Organic Compounds)- emisioetan izandako murrizketak ere eragina izan zezakeen troposferako ozo-



noaren eta atmosferako metanoaren kontzentrazioaren murrizketan. Izan ere, KOL eta oxido nitrosoa murriztean, ozono gutxiago ekoizten da, eta metanoa suntsitzen duten OH erradikalen kontzentrazioa hazten.

AZKEN GLAZIAZIO ALDAKORTASUN KLIMATIKOA

AZKEN GLAZIAZIOAREN FASEAK

Ezin da zorrotzegia izan Azken Glaziazioaren eskala globalean mugatzen dituzten datak eta periodoak zehazteko ulean. Edonola ere, aurrerago aztertuko ditugun hozte- eta berotze-gertaera laburrak kontuan izan gabe (Heinrich gertaerak eta Dansgaard-Oeschger aldiak), itasasoaren mailaren hiru jaitsiera handiaren arabera bana daiteke Azken Glaziazioa. Koralterrazen eta foramineo bentikoen oxigeno-isotopoen bilakaeraren arabera, duela 115.000, 85.000 eta 30.000 urte izan ziren hiru gertaera horiek.

Lehen fasea. Duela 115.000-85/75.000 urte

Azken glaziazioa -Würm deitzen zaio Europan, eta Wisconsin, Amerikan- duela 115.000 urte hasi zen, eta hotzerako lehen trantsizioa oso bizkor gertatu zen toki askotan. Lehen fase hartan. 5e itsas estadio isotopikotik 5d-ra igao zen ozeanoetan, eta nabarmen jaitsi zen uraren o18 O. Eta o18O-aren urritze hura bi arrazoi hauengatik izan zen: kontinenteetako izotza azkar metatzearen ondorioz ezeanoetako uraren bolumena txikitu egin zelako -horrek 50 metro inguru jaitsarazi zuen itsasoaren maila milurteko gutxian-; ur abisalen tenperatura 1,5 °C baino gehiago jaitsi zelako. Kontinenteetako aztarnategi askotan ere ederki nabarmetzen da hoztearen hasiera hori. Adibidez, Europako aztarnategi batzuetako denborazko polen-serieen arabera (adibidez, Grand Pile-ko azarnategia Vosgeak mendigunearen hegoaldean), duela 115.000 urte inguru, mende bakar batean, aldaketa ikaragarria gertatu zen Eemdarrean zen pago lizar eta hurritzeko landaretza epeletik, pinu, izen eta urkiz osatutako landaretza askoz ere hotzagora.



Ondoren, Grand Pile-ko polen-erregistro horren arabera, glaziazioaren lehen hogeita hamar milurtekoetan -duela 115.000 urte eta 85.000 urte bitartean- klima hoztu egin zen Ipar Europan, baina ez aski, zuhaitz-erako landaretza gal zedin. Hegoaldeko, Erdialdeko Mediterraneoko dagoen polen-aztarnategi oso batek -Monticchio-ko Aintzira Handiagok, Italiako hegoaldean- erakusten du glaziazioaren lehen parte -duela 115.000 urte eta 75.000 urte bitartean gutxi gorabehera- dezente beroagoa izan zela bigarrena baino. Badirudi leku horretan ez zela nabaritu hasierako hoztea (duela 115.000 urte ingurukoa), eta klimak bero iraun zuela duela 75.000 urte glaziazioan bete-betean sartu zen arte. Edozein moduz ere, klima epeleko lehen berrogei milurtekoetan, estadial oso hotz bat izan zen, iparraldeko hotzarekin batera agertu zena (duela 85.000 urte inguru). Estadial hotz hark mende batzuk bakarrik iraun zuen, baina errotik eten zuen glaziazioaren lehen parteko klima atsegina Monticchio-n eta, seguru asko, Mediterraneo osoan.

Bigarren fasea. Duela 85/75.000-30.000 urte

Duela 85.000 urte eta 75.000 urtean, bigarren izotz-metatze handi bat zen kontinenteetan. Ondorioz, beste 20 metro jasi zen itsasoaren maila, eta gaur egun baino 70 bat metro beherago gelditu zen. Grand Pile-n belar eta zuhaixkez bakarrik osatutako tundrako landaretzak hartu zuen zuhaitzen lekua. Frantziako hego-mendebaldean dagoen Villars-eko leizeko estalakita baten azterketa isopokoek ere 10 °C-tik gorako tenperatura-jaitiera adierazten dute, batez beste, aipatutako milurteko horietan, gutxi gorabehera. Greziako Ioannina-n, zuhaitzen polena ia zeharo ezkutatu zen MIS4 estadioko milurtekoetan, duela 70.000 urte eta 60.000 urte bitartean. Orduan hasi zen bigarren

fasea, duela 30.000 urte arte iraun zuena eta askoz ere garai hotz luze eta gogorragoak izan zituen. Fase hark ia MIS3 estadio isotopikoa osoa hartzen du bere baitan.

Hirugarren fasea. Duela 30.000-19.000 urte

Duela 30.000 urte hasi zen glaziazioaren faserik hotzena maila globalean -baina, seguruenik, ez leku guztietan-, eta, fase haren barruan, Azken Maximo Glaziarra izeneko -duela 23.000 eta 19.000 urteen artean- izan zen garairik hotzena. Azken fase hori MIS3 estadio isotopikoaren amaierari eta MIS2-ren lehenengo parteari dagokio. Garai hartan, itsasoaren maila gaur egungoa baino 120 metro beherago jaitsi zen. Ondorioz, Siberiaren eta Alaskaren arteko Beringiaz gainera, sakonera txiki-ko urekin estalitako beste eskualde asko urgaineratu ziren. Azkenik, duela 19.000 urte. itsasoaren maila igotzen hasi zen, beriz ere, eta desglaziazioa hasi zen, zeina duela 11.500 urte amaitu baitzen, gaur egungo Holozeno glaziazioartean sartzearekin batera.

ALDAKORTASUN KLIMATIKOA

Glaziazioan zehar, hoztea eta zen era uniformean gertatu; noizean behin, milaka urteko iraupeneko hotz handiagoko aldiak egon ziren, estadial deiturikoak. Estadial hotz haien amaieran, zenbaitetan, izotz-estalki kontinentaletako iceberg-multzo handiak amiltzen ziren Ipar Atlantikoko itsasora. Heinrich gertaerak deitzen zaie horiei. Estadialetako hotza bat-bateko berotze-aldi batzuen eteten zuten. Horiei, berriz, estadial arteko periodo deitu izan zaie tradizionalki edo, terminologia modernoagoa erabilita, Dansgaard-Oeschger berotze-gertaerak. Estadial arteko periodoetako tenperaturak estadialetakoak baino askoz beroagoak izaten ziren kontinenteetan eta itsasoetan, eta, batzuetan, mende-eskalako periodo laburretan, ia glaziazio arteko periodoetakoak bezain beroak. Dirudienez, aldizka, 1.500 urte inguruko zikloetan etortzen ziren periodo horiek; eta ikerlari batzuek Gleissberg eta De Vries eguzki-zikloekin lotzen dituzte. Gainera, frogatu hal izan denez, aldaketa termino haiek ez zieten Ozeano Atlantikoari eta inguruko itsasoei bakarrik eragiten (adibidez Mediterraneo), baizik eta baita askoz urrutirago zeuden lekuei ere. Adibidez, badirudi Groenlandiako izotzetan identifikatutako estadial arteko periodo atlantikoak eta Asiako montzoi indartsuenak aldi berean gertatzen zirela. Munduko hainbat lekutako leizeetan -Soreq (Israel), Hulu (Txina) eta Sukutra (Indiako Ozeanoa)- dauden estalakiten kaltzitzen konposizio



isotopikoaren azterketek ere erakusten dute aldakortasun handi hori.

Ipar hemisferioko izotz-estalki handien tamainaren aldaketa azkarak egon litezke Azken Glaziazioako aldakortasun klimatikoaren oinarrian. Aldi berean, tamaina-aldaketa haiek aldaketak eragiten zituzten atmosferako eta ozeanoetako zirkulazioan, berezki, Ipar Atlantikoan. Horrez gain, itsasoaren mailak ere aldaketa handiak izaten zituen; koral-azterketen arabera, 35 metrora artekoak. Halaber, oso litekeena da izotz-estalkietan elkarren segidan gertatutako izotz-metatzeak eta -urtzeak aldaketak eragin izana uraren gazitasunean, eta horrek ere itsaslaster termohalinoen sistema osoari eragitea.

Egiaz, nahiko frogas sendoak aurkitu dira glaziazioan zehar Ipar Atlantikoko tenperaturak eta itsaslasterak gaur egungoetatik oso desberdinak direla egiaztatzeko. Hala, Golkoko itsaslastera ahuldu egiten zen, eta haren eragina ez zen iristen 45° N latitudeetik gora. Bestalde, ur polarraren masa hegoalderantz hedatzen, eta haren hegoaldeko ertza paraleloan hedatzen zen Estatu Batuetako ipar-ekialdeko kostatik Iberiar penintsularaino. Alegia, Atlantikoaren iparraldean ur subtropikalaren eraginekin at zegoen, gaur egun ez bezala. Beraz, Ozeano Atlantikoak askoz gutxiago leuntzen zuen Europako klima. Laurenditar izotz-estalkitik eroriako izotzak ozeanoan urtean, Ipar Atlantikoko urak gezatzen zituzten, eta itsaslaster termohalinoak aldatzeaz gain, goi-latitudeetako eta latitude ertainetako haize-fluxuak ere alda zitzaizketen. McAyeal-en eredu baten arabera, Laurenditar izotz-estalkiak hazkunde-garaiak izaten zituen behin eta berriz, eta, garai hotzenera, izotzaren lodiera 3.000 metrotik gorakoa izatera iristen zen. Eta, haien ondoren, deskarga azkarreko periodoak izaten ziren, zeinetan domoaren altuera 1.000 metro baino gehiago murrizten baitzen. Aldaketa topografiko horiek aldaketa handiak sortzen zituzten mendebaldeko haizeen ibilbidean, eta, Ozeano Atlantikoari ez ezik, Ozeano Bareari ere eragiten zioten. Hala, Ozeano Barearen iparraldeko antizikloi subtropikalaren posizioa eta indarra aldatzen ziren, baita eskualde horretako ozeano-zirkulazioa ere. Izatez, azken 40.000 urteetan, fluktuazio handiak nabaritu dira Kaliforniako kostako ur polarretako N. Pachyderma foraminiferoaren -ur hotzetako adierazlea- ugaritasunean, eta horrek adierazten du Ozeano Barearen ekialdeko ur polarrek bat-bateko aurrerakadak eta atzerakadan egin zituztela hegoalderantz.



TOBAREN ERUPZIOA

Azkenik, aipatu behar da glaziazioaren bigarren partearen hasieran, duela 73.500 urte inguru, azken ehun milurtekoko sumendi-erupziorik handiena izan zela Sumatra iparraldean: Toba sumendiarena. Erupzioaren tikitik milaka kilometrora dauden itsas estratueta aurkitu dira haren errautsak. Tobak mila milioi bat tona sumendi-hauts eta gas sulfuroso egotzi zituen atmosferara. Bolkanologoek kalkulatu dute leherketek gaur egon ugari iraun zutela. Halaber, kalkulatzen arabera, azken ehun mila urteetako beste edozein erupzio baino hamar aldiz indartsuagoa izan zen hura. Gas sulfurosoak aise heldu ziren estratosferara, 21-31 km arteko altuerara. Eta handik hilabete batzuetara, estratosferako zikinkeria zabaldu, eta planeta osoa estaliko zuela pentsatzen da. Groenlandiako izotzetan egindako GISP zundaketako aurkikuntzen arabera, urte haietan -2.000-2500 m-ko sakonerako izotzei dagozkien urteetan-, ikaragarri hazi zen sufr-prezipitazioa. Hala, estratosferako hauts, lurrun eta gas sulfurosoek izugarri handituko zuten planetaren albedoa. Ondorioz, eguzki-argia asko murriztuko zen, eta lurra luzaroan egongo zen ilunpean. Oso litekeena da Ipar hemisferioan tenperaturak 3 °C eta 5 °C artean jaistea zantzu urtez, eta latitude polarretan udako tenperaturak 10 °C jaistea bizpahiru urtez.

Azken Glaziazioa hasi ondoren gertatu zen Tobaren erupzioa, baina hotza areagotu zen periodo batean: mis 5a estadio isotopiko ozeanikotik mis 4-erako trantsizioan. Milankovic-en parametroek Ipar hemisferioko izotz-estalkien hazkundera eragin zuten, berriz ere (udako intsolazio apala), eta, agian, Tobaren erupzioak areagotu egin zuen prozesu hura. Ondorioz, itsas mailaren beste beheakada bat gertatu zen, eta, ordutik duela 30.000 urte ingurura arte, gaur egungo maila baino 70 baino 70 bat metro beherago egon zen. Rampino-k dioenez, agian, aurretik gertatutako itsas mailaren beheakada batek litosfera ezegonkortzean gertatu zen erupzioa, eta horrek hozte-prozesua azkartu zuen.

HEINRICH GERTAERAK

Azken Glaziazioan Heinrich gertaerak izeneko sei aldi izan ziren. Aldi haietan, icebergek garraiatutako arroka-detrituen kantitate



ohi baino handiagoak metatu ziren Ozeano Atlantikoaren hondan, 40° N eta 55° N latitudeen arteko eremuan. Izotz-puska haiek ur beroagoetara iristean, urtu egiten ziren, eta, itsasora erori baino lehen kontinenteko substratutik erauzitako eta, ondoren, izotz-puska haietan garraiatutako material harritsuak askatu, hondoratu eta Atlantikoaren hondan metatzen ziren. Harmut Heinrich ikertzailea ohartu zen duela 17.500, 22.000, 30.000, 45.000 eta 65.000 urte eratutako sedimentu-maila haiek Ipar Europako kostaldeetako arroka-zatiak dituztela, baina gehienak Ipar Amerikatik datozela, eta, bereziki, Hudson badiatik. Icebergen ibilbideak -metatuko sedimentuek eta material horie lodiera desberdinekin markatzen dute ibilbidea- adierazten du beren jatorritik 3.000 kilometro baino gehiagoko bidea egiten zutela. Hala, aurkitutako detrituen lodierak mendebaldetik ekialdera txikiagotu ohi dira, zenbait metroko lodieratik zentimetro gutxi batzuetara.

Normalean, baina ez beti, 10.000 urte inguru irauten zuten hozte-fase progresibo baten amaierarekin batera etortzen ziren Heinrich gertaerak, eta, halaber, bat egiten zuten Ipar Atlantikoko uretako Neoglobobioquadrina Pachyderma foraminifero planktonikoaren -buztan lebigiroduna eta ohikoa ur polarretan- ugalketarekin. Teoriarik onartuenaren arabera, Amerikako izotz-estalkiak gehiegi hazi eta desokeratu egiten ziren, eta izotz-amiltze handiak gertatzen ziren; hondoren ondorioz, noraezean zebiltzan izotzpuska talde handiez betetzen zen Atlantikoa. Zorupe arroksuko beroak izotza aspitik urtzeak ere eragin zitzaizkion kolapso haiek. Halaber, aipatu izan da, Laurenditar izotz-estalkiaren beraren zama handitzean, lurrikara txikiak sortuko zirela, eta haiek izotza amilaraziko zutela. Heinrich gertaerekin batera etortzen zen hoztearen aztarnak agertzen dira sedimentuen azterketetan (alkenonak, foraminiferoak, aintziretako sedimentuak), eta icebergak ibiltzen ziren lekuetatik oso urrun, gainera: Portugalgo kostaldean, Mediterraneoko mendebaldean, Brasilgo ipar-ekialdean, Gaineako Golkoan eta Floridako penintsulan, besteak beste. Gainera, badirudi hozte-aldi haiek Asiako montzoien intentsitateari ere eragiten zizotela, telelatura ozeaniko eta atmosferiko konplexuen bidez. Hegoaldeko itsasoetan ere -hain zuzen, Zeelanda Beriko hegoaldeko uhartearen inguruan egindako zundaketa batean-, alkenonak aztertuz, aurkitu da Heinrich aldietan fitoplanktonaren produktibitatea hazi egiteen zela, beharbada, zirkulazio ozeaniko termohalino globalean izandako aldaketen eraginez.

Heinrich gertaerek eragina zuten klima globalean -edo, behintzat, Ipar hemisferioko kliman-, izan ere, ur gezaz-

ko icebergak urtzean, Ipar Atlantikoko azaleko uren gazitasuna murrizten zen eta, ondorioz, txikitu egiten zen uraren dentsitatea ere, eta Iparaldeko Itsasoetako ur-hondoratze konbektiboaren mugimendua ahultzen zen. Atlantikoko ur sakonen ekoizpen txikiago hura Antartika inguruko ur sakonen ekoizpen handiagoaz konpentsatzen zen. Antartikako ur sakon haiek iparralderantz abiatzen ziren, ekuatorea igarotzen zuten, eta itsasoen hondotik joaten ziren, Ipar hemisferioko latitude oso altuetara iritsi arte. Ozeano Atlantikoko zirkulazio termohalino oso ahaltsua zegoenez, Golkoko itsaslastera ez zen heltzen goi-latitudeetara, eta, ondorioz, ur polarren masak gero eta hegoalderago hedatzen ziren itsasoen gkostalderaino. Hain zuzen, Portugalen hegoaldeko kostaldean egindako zundaketen arabera, desglaziazioaren hasierako Heinrich-1 aldiaren -duela 18.000 eta 16.000 urteen artean- tenperaturak hoztagoak ziren Azken Maximo Glaziarrekoak baino. Hala, Heinrich gertaeretan eskualde tropikalen eta latitude ertainen eta goi-latitudeen arteko gradiente termiko latitudinala handitzen zen, eta horrek aldaketak eragiten zituen hezetasunaren garraio atmosferikoan (eskialdekoak eta meridianok), zeinak, aldi berean eragina baitzuten Atlantikoko eta Ozeano Bareko kliman.

Heinrich gertaerak amaitzean, Ipar Atlantikoko urak gazitu egiten ziren, eta gazitze hura funtsezkoa zen zirkulazio termohalino lehengora zedin. Iceberg-deskargen ondoren, itsasora heltzen ziren mihi glaziarren izotz-masak txikitu egiten ziren leku askotan Ondorioz, ur geza gutxiago heltzen zen itsasora, eta, beraz, Ipar Atlantikoaren gazitasunak gora egiten zuen beriz ere. Hala, garraio-zinta ozeanikoa berrezartzen zen berehala, eta Golkoko itsaslastera indartzen. Aldi berean, horrek tenperaturak gogaratzen zituen, bat-batean, latitude ertainetan eta goi-latitudeetan, eta horrela hasten ziren estadiak arteko periodo beroak. Halaber, Heinrich gertaeraren ondotik Ipar Atlantikoko ura berriro nola gazitzen zen azaltzeko, aipatzen da ezen izotzak amildu eta Laurenditar izotz-estalkiaren altuera jaistean atmosferako zirkulazioa aldatzen zela, eta horrek eragin zezakeela aipatutako gazitzea. Aurreko periodo hotzean, gero eta altuera eta bolumen handiagoa zuen Laurenditar izotz-estalkiak iparraldeko haize



izugarri hotzak areagotzen zituen, zeinak Atlantikora iristen baitziren Laurenditar izotz-estalkiak berak eta Groenlandiak osatzen zuten haranetik (gaur egungo Baffin eta Labrador itsasoak). Artikoko haize izotzu haiek gero eta gehiago hozten zituzten Atlantikoaren ipar-mendebaldeko azaleko urak. Gero, Laurenditar izotz-estalkiaren altuera murriztean, gaur egungoen antzeko baldintzak- hau da, mendebaldeko haize ez hain hotzak- nagusitzen ziren berriz ere. Mendebaldeko haize haien lurruntze-efektu handiagoak Ipar Atlantikoko azaleko urak gazitzen, loditzen eta, neurri handiagoan edo txikiagoan, itsaslaster termohalinoak eta Golkoko itsaslastera berrezartzen laguntzen zuten.

DANSGAARD-OESCHGER BERO-OSZILAZIOAK

Heinrich gertaeretako iraupen laburreko aldi hotzez gain, Azken Glaziazioan iraupen laburreko hogeit bat aldi bero izan ziren. Dansgaard-Oeschger gertaerak izenekoak. Gertaera horietan, izugarri igotzen zen tenperatura hamar bat urteko oso aldi laburretan. Gertaera haiek erregistratuta geratu ziren groenlandiako izotzaren oxigeno-isotopoetan, baita Erdialdeko Europako aintzira batzuetako karbonato-sedimentuetan ere. Dansgaard-Oeschger gertaeretako tenperatura-igoerak 5 °C eta 8 °C artekoak izaten ziren. Hala ere, duela 70.000 urte inguruko DO-19 aldiari buruzko azterketa zehatz eta berri baten arabera, izotze-

an harrapatutako nitrogenoaren azterketa isotopikoak askoz igoera termiko handiagoa (16 °C artekoa) adierazten du. Zenbait autorek itsasoko eta itsasertzeko zorupetik atmosferara isuritako metanoak sortutako berotegi-efektuarekin lotzen dituzte, zuzenean, tenperatura-igoera haiek. Baina beste zenbait azterketa isotopikok adierazten dute hori ezinezkoa zela. Horien arabera, metanoaren bat bateko kontzentrazio-igoerak ez zetozen zorupetik, baizik eta, berotzearen ondorioz, kontinenteetan hazitako hezetasunaren eta biomasaren ondorioa ziren.

TROPIKOKO ALDAKORTASUNA

Oszilazio termikoen eragina eskualde subtropikaletaraino heltzen zen, Atlantikoan gutxienez. Are gehiago, zenbait adituren ustez, tropikoan bertan zegoen aldakortasun global haren jatorria. Hala, periodo bero tropikaletan, lurruntze han-



diagoa izaten zen eta atmosferak hezetasu gehiago garraiatzen zuen Atlantikotik Ozeano Barera, Erdialdeko Amerika ekialdetik mendebaldera zeharkatzen duen aire-masen bidez. Horrenbestez, uste da Atlantikoaren gazitasuna handitu, eta zirkulazio termohalinoa eta Golkoko itsaslasterra indartzen zirela, eta horrek Ipaar Atlantikoko osoa berotzen zuel, Groenlandia barne. Halere, goi-latitudeetako eta latitude tropikaletako oszilazio termikoak zehatzago datatzean, baliteke fase horrekin guztiz bat ez etortzea, eta kontrakoa adieraztea, hau da, desfase bat dagoela, zeinaren arabera, tropikoko garai beroenetan hezetasun gehiago garraiatzen denez, elur gehiago egiten du goi-latitudeetan eta iparraldeko izotz-estalkien bolumena hazi egiten baita. Cariaco-ko arroaren ikerketak arazo hori argitzen lagun lezake, besteak beste.

Cariaco-ko itsas arroa 10° N aldera dago, Venezuelako itsasertz kontinentalaren (hegoaldean) eta Tortuga eta Margarita uhartearen (iparraldean) artean. Ozta-ozta urgaineratutako urpeko hesi batek ia erabat ixten dio Ozeano Atlantikorako bidea. 300 metro-tik beherako urak anoxikoak dira, batez ere, sakoneko uren zirkulazioa oso mugatua delako. Horrek sedimentu planktonikoen bioturmazioa galarazten du, eta, aldiz, horien metaketa eta kontserbazioa errazten ditu. Ondorioz, sedimentu-xaflen serie luze eta jarraitua sortu da eremu horretan, sedimentu organiko eta ez-organikoekin osatua eta milurteko bakoitzeko 70 cm inguruko lodiera duena. Urtaroen arabera kolore-aldaketei esker, xafla horiek bereizi eta zenbatu egin daitezke, eta, horregatik, sedimentuen datazio nahiko zehatza egiten daiteke. Udan, tropikoen arteko konbergentzia-eremua (ITCZ) iparraldera mugitzeak Cariaco-ko arroari eragiten dio, eta euri ekartzen du. Garai horretan, material terrigeno (ilinak) asko jalkitzen dira. Neguan eta udaberrian, aldiz, ITCZ hegoalderago urruntzen delarik, ekialdeko alisioak etortzen dira. Ondorioz, klima lehorra eta hai-



zetsua bihurtzen da. Sedimentu terrigenoak gutxitu egiten dira, baina kostako upwelling-a areagotzen da, eta horrek planktonaren ugartzea bultzatzen du, bereziki, *Globigerina bulloides* foraminiferoarena. Sedimentatzean, planktonaren eskeletoek udako terrigenoek baino kolore argiagoko xaflak sortzen dituzte. Cariaco-ko arroak Venezuelako kostaldean duen zolan sedimentatutako estratu meheen kolorearen islakortasun-aldaketen (grisen eskala) azterketa batek erakusten duenez, plankton askoko urteetan ohikoa den kolore argiagoa glaziazioeko periodo hotzenetan metatutako sedimentuei dagokie. Garai haietan, Atlantikoko alisio-haizeak indartu egiten ziren eta sakoneko urak -hotzagoak eta emankorragoak- gehiago azaleratzen. Aitzitik, periodo beroetan -zeinak, itxuraz, Dansgaard-Oeschger gertaerekin bat baitatoz-, sedimentuen kolorea ilunagoa da, eta islakortasuna txikiagoa. Gainera, etratu horietan, sedimentu terrigeno gehiago ageri dira, ustez, garai beroetan arro horretan itsasoratzen ziren ibaien lurruntze, prezipitazio eta isurketa handiagogen eraginez.

AZKEN MAXIMO GLAZIARRA

Duela 115.000 urtetik aurrera eta glaziazioan zehar, airea hoztuz joan zen poliki-poliki, baina ez era linealean. Hain zuzen, duela 22.000 urte inguru iritsi zen punturik hotzenera, hau da, Azken Maximo Glaziarra. Garai hartan, planetareen gainazaleko batez besteko tenperatura globala glaziazioaren hasieran baino 7 °C hotzagoa izatera iritsi zen.



HOTZAREN ETA IZOTZAREN MAGNITUDEA

Hoztearen magnitudea oso desberdina izan zen latitudearen arabera. Hala, jaitziera termikoa askoz handiagoa izan zen goi-latitudeetan, behe-latitudeetan baino, eta halaber, tenperatura askoz ere gehiago jaitsi zen kontinenteen barnealdean kostaldean baino. Lurreko leku askotan tenperatura 15 °C baino gehiago jaitziko zela pentsatzen da. Groenlandian duela gutxi egindako zundaketetan ondorioztatu denez, Azken Maximo Glaziarreko tenperatura gaur egungoa baino 23 °C baxuagoa zen Summit-en, hau da, oxigenoaren eta izotzaren deuterioaren azterketa isotopikoe-tatik ondorioztatutakoaren bizikoitza (10 °C inguru). Ipar hemisferioko lurraldeko tenperatura, batez beste, 5,7 °C eta 8,7 °C arte-

hoztu ziren. Ipar Atlantikoko goi-latitudeetako azaleko urak, berriz, 10 °C-tik gora hoztu zirela pentsatzen da. Azken hamarkadetan, itsaso tropikalak zenbateraino hoztu ziren eztabaidatu da. CLIMAP nazioarteko proiektuko kideek 1976an egindako foraminiferoen azterketa isotopikoan oinarritutako gainazaleko tenperaturen zenbatespenen arabera, 2 °C bakarrik jaitziko zen tenperatura, gaur egungoarekin alderatuta, eta, gainera, 1-2 °C igo zen Ozeano Bareko zenbait eskualde subtropikale-tan. Alabaina, itsaso tropikaletako foraminifero-taldeen aldaketen azterketa berri batek hozte handiagoa adierazten du (3 °C eta 4 °C artekoa), bereziki, Ozeano Atlantikoko eta Ozeano Bareko ekialdeko eskualdeetan. Azken Maximo Glaziarrean, duela 23.000 eta 19.000 urteen bitartean, glaziarretan eta izotz-estalki kontinentaletan metatutako izo-

an jaitsi zela kalkulatu da.

Lur tropikaletako tenperatura-jaitziera txikiagoa izan zen (5 °C gutxi gorabehera), nahiz eta aldaketa hidrologiko eta paisaiaren aldaketa handiak izan ziren eskualde horietan ere. Periodo hotzetan prezipitazioak gutxitu egin ziren, eta lehen oihanak ziren hedadurak sabana bihurtu. Itsasoari dagokionez, ozeanoetako azaleko ura 4-5 °C hoztu zen batez beste, eta sakoneko urak 1-2 °C

tza mailarik gorenera iritsi zen. Baina, kontinenteetan izotza metatu ahala, ura kentzen zen ozeanoetatik, eta, ondorioz, itsasoaren maila jaisten zen. Kontinenteetan metatutako izotza mailarik gorenera iristean, itsasoaren maila gaur egungoa baino 120-140 metro beherago gelditu zen. Hala, gaur egun urpean dauden plataforma kontinentalen zati ikaragarri zabalak agerian gelditu ziren. Beraz, ibai askoren behealdeko zatiek oso bestelako ibilbideak zituzten, eta gaur egun baino askoz ere urrunago itsasoratzen ziren.

Ipar hemisferioan, glaziazioak aldaketa handiak eragin zituen paisaian. Garairik hotzenetan, izotz-estalkiek eta lurzoru izotzuek (permafrost) 27 milioi kilometro koadro hartzen zituzten iraunkorki, neguan eta udan, hau da, Ipar Amerikako eta Eurasiako eremu kontinentalen % 40. Mendialdeetako elur iraunkorren mailarik baxuena gaur egungoa baino 900 metro beherago zegoen, gutxi gorabehera.

Hego hemisferioan, beriz, ez ziren hainbeste hedatu izotzak hartutako eremu kontinentalak, itsasoak galarazten zuelako. Antartikan bertan, badirudi Azken Glaziazioan ez zela egun baino askoz izotz gehiago metatu. Hego Amerikan -Hegoaldeko Andean eta Patagonian- eta Zeelanda Berriko mendietan, elur iraunkorren maila 1.000 metro inguru jaitsi zen. Bestalde, Zeelanda Berrian egindako azterketa polinikoen arabera, tenterratura hotzeneko garaia -hau da, Azken Maximo Glaziarra- lehenago iritsi zen Hego hemisferiora Ipar hemisferiora baino, hau da, duela 28.000 eta 30.000 urteen artean.

Itsasoan, Azken Glaziazioeko garairik hotzenetan, izotz-bankisak estalitako eremua handiagoa zen Artikokoan -Ipar Atlantikotik Islandiako hegoalderaino hedatzen zen- eta Antartikan (gaur egun, itsasoko izotz-bankisa Lurraren azalaren 5 10 estaltzera iritsi daiteke, gehienez).

Ipar Atlantikoan, gaur egungoa ez bezalako zirkulazio batek ekialderantz eramaten zituen Laurentiar estalkitik zetozen icebergak, eta iceberg haiek oso hegoaldera heltzen ziren, Iberiar penintsularen pareraino. Itsasoko uren hoztasunak -gaur egun baino 5-10 °C hotzagoak ziren- hegoalderago joaten laguntzen zieten, bere-



ziki neguan. Hotz handi hark eragina zuen Mediterraneoan ere. Marseillatik gertu dagoen Cosuqe leizean -sarrera urpean du gaur egun-, duela 20.000 urte bizi izan ziren historiaurreko biztanleek Pinguimus impennis espezieko pinguinoak margotu zituzten leizebarruko hormetan. Geroztik, Holozenoan, Ipar Atlantikoan bakarrik bizi izan da espezie hori.

Antartikako izotz-bankisa oso iparralderantz hedatzen zen neguan, baina Drake itsasartea -Antartika eta Hego Amerika artean- ez zen sekula izotzu, eta, beraz, inoiz ez zen desagertu kontinente hori inguratu eta isolatzen duen itsaslaster ozeaniko hotza. Udan, bankisa australak hedadura txikia zuen -gaur egungoaren antzekoa-, Antartikaren kostaldeko sedimentuetan aurkitutako diatomeoen muga latitudinalen azterketak erakusten duenez.

LAURENDITAR ETA FINOESKANDINAVIAR IZOTZ-ESTALKIAK

Glaziarrek aurrera egitean, izitzez estalitako bi eremu handi eratu ziren, bata Ipar Amerikan eta bestea Eurasiaren iparraldean: Laurenditar izotz-estalkia eta Finoeskandinaviar izotz-estalkia, hurrenez hurren. Izotza metatzen zer eremua oso hegoaldera iristen zen garairik hotzenetan. Hala, iparraldeko izotz-estalkiek ez zituzten estaltzen goi-latitudeak soilik, baizik eta latitude ertainetan ere barneratu ziren.

Baina oraindik ez da argitu nondik zetorren kontinenteetan -bereziki Laurenditarrean- hain laster metatzen zen izotz-bolumen ikaragarri hura sortzeko hezetasuna. Orain arte, hezetasun hura Ipar Atlantikotik zetorrela uste zuten gehienek. Horretarako, itsasoaren gainazala luzaroan bero mantendu zela uste da,

Golkoko itsaslasterrak funtzionatzen jarraitzeari esker Baina Laurenditar izotz-estalkia eratzeke, gaue egun Quebec-en eta Estatu Batuetako ipar-ekialdean egiten dituenak baino elur-ekaitz askoz ere handiagoak behar ziren, eta maizago. Gaurkoak baino hamar aldiz handiagoak ziren elurte haiek oso fronte aktiboek eragin behar zituztela pentsatzen da, eta fronte haiek kontinente amerikarretik zetozen aire hotzeko masa polarraren eta Ozeano Atlantikoan eratzen ziren aire heze eta epelen kontrastetik sortzen zirela.

Bigarren teoria berriago baten arabera, hezetasun hura hegoaldeko latitudeetatik zetorren, baita latitude tropikaletatik ere. Foraminiferoaren azterketa zehatzak erakusten duenez, goi-latitudeetako urak oso azkar hoztu ziren, eta, glaziazioaren hasieran gertatu zenez hori, ur haiek ezin zitezkeen izan hezetasunaren iturria. Aldiz, latitude tropikaletako azaleko urak bero mantendu ziren, eta, hasieran, are gehiago berotu zirela uste da. Hala, gradiente termiko meridianoa handitu zen, eta, ondorioz, hezetasun gehiago garraiatzen zen tropikotik



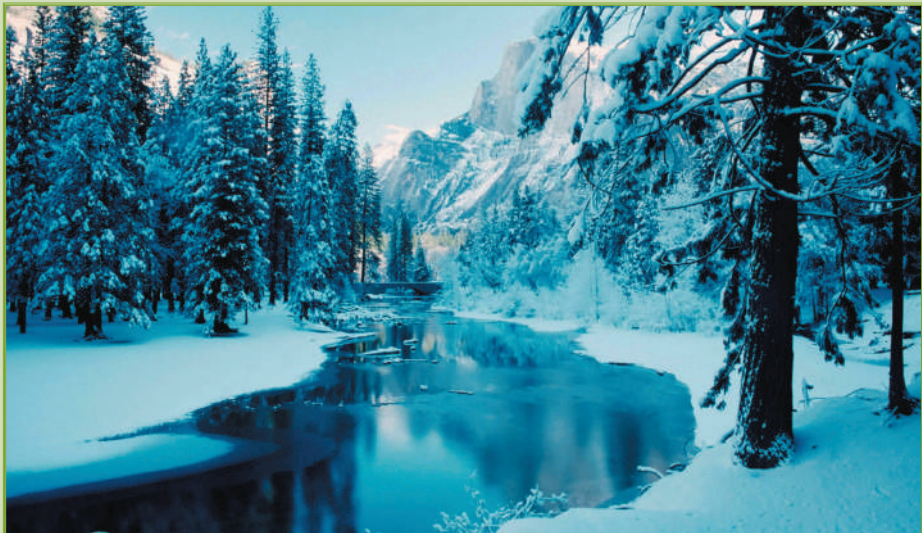
artikora.

Gainazaleko aire-masa polar hotz eta lodiak hegoalderantz doazenean, aire subtropikalezko itsaslaster bat eratzen da altueran eta ertzetan, kontrako noranzkoan (hegoaldeetik iparraldera), eta hegoalderago, ur beroagoetan lurrundutako hezetasuna eramaten du berekin. Glaziazioan, Laurenditar eta finoeskandinaviar izotz-estalkiak eratzen ari ziren bitartean, areagotu egin zen aire-masa oso desberdinen truke meridianoa.

Ozeano Barean, Mendi Harritsuen ipar-hego konfigurazioak itzulerako itsaslaster beroak indartzen zituen, zeinak Artikotik zetorren gainazaleko aire-masa hotzaren gainetik eta ekialdeko ertzetatik joaten baitziren iparralderantz. Masa haien hezetasunak elur ugariz hornitu zituen Laurenditar izotz-estalkiaren mendealde eta Ipar Amerikako Kostako Mendieta izotz-estalkia.

Laurenditar izotz-estalkia

Ipar Amerikako-estalki nagusiak. Laurenditarrek, 16 milioi km²-ko hedadura zuen Azken Maximo Glaziarrean (Espainiaren azalera halako 32), eta 30 milioi km³ inguruko bolumena, gaur egun Antartika estaltzen duen izotz-estalkiarena baino handiagoa. Horrek esan nahi di Ipar Amerikako izotz kontiennetala planetako izotz kontinental guztiaren hereen bat zela bolumenean. Laurentiar izotz-estalkia hegoalderantz hedatzen, Ipar Amerikako ekialdeko kostako 36° N latituderaino iristen zen, hau da, gaur egun New York dagoen pareraino (Europar ere antzerako hedapena gertatu izan balitz, Finoeskandinaviar izotz-estalkia Mediterraneo itsasoraino helduko zen). Atlantikotik jasotako hezetasun handi hari esker, izotz gehiago metatzen zen Laurenditar izotz-estalkiaren ekialdeko erdian. Domoaren gailurra gaur egungo Hudson badiaren hndoratua baino gorago zegoen. Leku horretan, 3.000-4.000 metroko lodiera zuen izotzak. Ipar Amerikako eta Kanadako ipar-ekialdeko kosta atlantikoan eratzen ziren neguko ekaitz gogorrek ekarritako hezetasun ozeanikoak elikatzen zuen eskualde hori guztia. Baliteke mendealdean ere, Keeeatin-en gainean, beste domo garrantzitsu bat izatea. Mendealdeana, Mendi Harritsuen sistemara iristean, Ozeano Bareko Kostako Mendiak estaltzen zituen mendealdeko izotz-estalkiarekin (Mendikateko izotz-estalkia) elkartzen zen Laurenditar izotz-estalkia. Bien artean, haran meridianoa bat zegoen, lehenago urtu zena, eta, agian, Asiatik iritsitako aitzinak herri



amerikarrek haran hura erbaili zuten hegoaldera migratzeko. Ipar Amerikako mendealdeko eskualde horretan, askoz txikiagoa zen hezetasun-horniketa. Alaskaren zati handienean ere ez ziren izotz-geruza handiak eratu itsasoaren mailan. Hala, hainbat frogak erakusten dutenez, eskualde horretan babestu ziren zenbait espezie konifero, eta hotzari aurre egin ahal izan zioten. Bestalde, ozeanoaren gainazala gaur egun baino 120 metro beherago zegoenez, ez zen existitzen gaur egungo Bering itsasartearen -Alaska eta Siberia banatzen dituen- eta, beraz, animaliak gizakiak Asiatik Amerikara igaro zitezkeen.

Finoeskandinaviar izotz-estalkia

Europar, Finoeskandinaviar izotz-estalkia 7 bat milioi km³-ko bolumena izatera heldu zen Azken Maximo Glaziarren, Laurenditar izotz-estalkia baino lau bat aldiz gutxiago, gutxi gorabehera. Finoeskandinaviar izotz-estalkiak gaur egungo Eskandinavia eta Finlandia estaltzen zituen nagusiki. Domoa 2.000 metro inguru lodi zen, eta haren altuerarik handiena gaur egungo Itsaso Baltikoaren iparraldean zegoen. Hegoalderantz, izotzak Itsaso Baltiko osoa estaltzen zuen, Danimarkaraino eta Alemaniako eta Poloniako iparraldeko lautadetaraino (gaur egun Berlin dagoen lekuaino). Hain zuzen, erliebe glaziarren aztarna garbiak utzi zituen izotzak leku horietan. Mendealderantz, berriz, gaur egun Ipar Itsasoko sakonera txiki-ko urekin estalita dagoen tundra zabal bat zeharkatuz. Fonoeskandinaviar izotz-estalkitik Britainiar izotz-estalkira igaro zitezkeen. Britainiar izotz-estalkiak Britainia Handia osoa eta ia Irlanda osoa zeuzkan azpian. Mantxako Kanala ere urgaineratuta zegoen, eta, seguruenik, Rhin ibaia mendealderantz okertzen zen gaur egungo ibilbidearekiko, eta, Mantxako Kanala zeharkatu ondoren, Atlantikoan itsasoratzen zen, Britainiaren parean. Itsasoaren maila oso behean zegoenez, Frantziako ipar-mendealdeko eta Kornuallesko hego-mendealdeko plataforma kontinental atlantikoaren zati oso handi bat ere urgaineratuta zegoen.

Barents-Kara izotz-estalkia

Ekialderantz, berriz, Finoeskandinaviar izotz-estalkiaren mugak nahiko lausoak dira oraindik ere. Izotza Siberiako iparraldera hedatzen zen, baina ez dakigu Atlantikotik uruz zeuden ekialdeko eskualdeetan behar adina elur egiten zuen izotz-estalki handi bat osatzeko. Barents eta Kara itsasoetako eta Errusiaren iparraldeko sedimentsu glaziarretan berriki egindako ezterketek erakusten dutenez, Finoeskandinaviar izotz-estalkia ez zen iritsi bere hedadura handiena izatera Azken

Maximo Glaziarrean, baizik eta glaziazioaren hasieran (duela 80.000 urte inguru), izotzak Mendealdeko Siberiako iparralde osoa estalki zuenean, Kara itsaso bane. Beraz, beha bada, gaur egun Artikoa itsasoratzen diren Siberiako ibaiak blokeatuta geratzearen ondorioz izotz-estaalkiaren hegoaldean laku handiak eratuko ziren, eta, batez ere, hegoaldera -Itsaso Beltzera eta Kaspiar Itsasora- bidalko zituzten ur haiek. Gerora, izotz-estalki hori txikitu egin zen, agian, izotz-estalki finoeskandinaviarra haztearen eraginez, mendealderantz hedatu baitzen eta itzal plubiometrikoa egin baitzion. Halaber, baliteke Atlantikoko eta Kara itsasoko urak hoztean, elur-kantitatea murriztea. Zirkulu polar artikoa, Uraal mendien iparraldean, duela 40.000 urteko giza-ken aztarnak aurkitu dira (agian Neanderthalak). Horrek esan nahi du, hotza egiten arren, agian, ordurako ez zegoela Barents-Kara izotz-estalkia, eta Finoeskandinaviar izotz-estalkia kontinente eurasiarraren mendealdean mugatzen zela. Azken Maximo Glaziarrean (duela 22.000 urte), badirudi Barents-Kara izotz-estalkia desagertua zegoela.

IDORTASUN GLAZIARRA

Glaziazioko hotzak idortasun handiagoa ekarri zuen berekin maila globalean, ziklo hidrologikoa mantsotzearen eraginez. Polen-azimategi, paleolurzu eta sedimentu glaziarren azterketatik ondorioztatzen da planetako biomasa ikaragarri pobretu zela. Adibidez, Europaren erdialdeko latitudetan permafrost-eremu handiak sortu ziren, non tundrako landareak bakarrik hazten baitziren. Mediterraneoaren iparraldeko kostaldeko lurak ere estepako landare lehorrekin estalita zeuden. Tropikaletan, sabanako paisia irekiagoek hartu zuten oihan askoren lekua. Amazonian, berriz, 6 °C inguru jaitsi zen tenperatura. Hoztearekin batera, prezipitazioak gutxitu egin ziren, eta, ondorioz, oihanak txikituz eta sabanak handitu joan ziren. Aurreko ziklo glaziarretan bezala, oihana zatitu, eta babesleku biologikoetan banatuta geratzen, txoko ekologiko horietako bakoitza modu independentean garatu zen, eta, agian, horrek eragin zuen gaur egun Amazoniak duen biodibertsitate aberatsa. Ozeanoaren gainazala hotzago zegoenez, Atlantikoko haize alisioek hezetasun gutxiago ekartzen zuten kontinentearen barnealdera, eta, neurri batean, prezipitazioak horregatik gutxitu zirela uste da. Halaber, baliteke oihanak txikitzeak berak gutxitzea prezipitazioak, Amazoniako prezipitazio guzteien erdia baino gehiago arroan bertan birziklatu eta lurrundutako uretatik baitator. Hala eta guztiz ere, Amazoniaren inguruko zenbait lekutan -gaur egun Brasilgo "cerrado" sabana-paisaia eta ipar-ekialdeko "caa-



tinga" paisaia idorrek okupatutako eskualdeetan- oso litekeena da, garai hartan, gaur egun baino prezipitazio handiagoko periodo ziklikoak izatea. Ekinozioen prezesioaren eraginez, euri-garaian (martxo aldera) intsolazioa maila gorenera iristean gertatuko ziren ziklo haiek. Fase euritsu haietan, tropiko arteko konbergentzia eremuak indarra hartzen zuen intsolazio handiagorearen eraginez. Hala, garai handietan, espeleotemen (estalaktitak eta estalagmitak) hazkundera berriz hasten zela adierazten dute zenbait kobazulotan egindako azterketek. Bestalde, uste da Amazoniako oihana Brasilgo kostaldea estaltzen duen oihan atlantikoarekin kontaktuan egongo zela eta espezieak trukako zirela.

Afrika tropikalean 5 °C inguru jaitsi zen tenperatura, Kongoko eta Gineako Golkoaren kostaldeko oihan gehienak sabana bihurtu ziren, eta oihan itxiko zati batzuk besterik ez ziren eratu ibai-bazterretan eta topografiak lagundutako kostaldeko zenbait lekutan. Ekialdeko Afrikako goi-ordokietan egindako azterketa polinikoez erakusten dute % 30 jaitsi zirela prezipitazioak, eta badirudi datu hori bat datorrela aintziren mailari buruzko fluktuazioen zenbatespenekin. Atmosferako zirkulazioan izandako aldeketek ere -kasu horretan, Eurasiatik Arabiako penintsulara eta Ekialdeko Afrikara iristen ziren haize lehorrak indartzea- lehortze horretan lagunduko zutela pentsatzen da. Zuhaitz-landaeretzaren altuera-mailaren jaitzieran eta Klamanjaroko elur iraunkorren mailaren jaitzieran oinarrituta, Azken Maximo Glaziarrean tenperatura 5.8 °C hoztu zela kalkulatu da.

Saharako basamortua gaur egungoa baino dezente handiagoa zen glaziazioko periodorik hotzenetan. Hegoalderantz hedatzen zen, eta Ekialde Hurbil osora eta Asiako hego-mendealderaino iristen. Paleoaintziren azterketak erakusten du ezen, iparraldean -Atlas mendien inguruan- eta hegoaldean -Aahel-eko zerrendan- idortasuna handiagoa zela. Kausa askogatik izan zitezkeen hori:

* Ur tropikal ozeanotik hotzagoak ziren Atlantikoan eta Indiako Ozeanoan; horren ondorioz, itsasoko ur gutxiago lurruntzen zen, eta, beraz, udako aire-masek hezetasun gutxiago ekartzen zuten Afrikako kontinentera.

* Atlantikoko Azoreetako antizikloi subpikala -estuagoa, baina indartsuagoa- sendotzean, haize alisioak indartzen ziren. Hala, sakoneko ur hotz gehiago azaleratzen ziren Afrikako mendealdeko kostan, eta horrek egonkortasun handiagoa ematen zien airearen beheko mailai. Bestalde, kontinentearen barnean, ipar-ekialdeko haize alisioak montzoi afrikarraren hego-mendealdeko haizeekin nahasten ziren udan, eta horrek Atlantikoko masa hezeak sartzea oztopatzen zuen.

* Sahararen eta Gineako Golkoaren arteko zerrendako landaretza desagertzeak hezetasu-

na kentzen zion aireari. Gogoan izan behar da Sahel-ere -Saharako hegoaldeko eskualde erdiidorrera- iristen den hezetasunaren parte bat, aurrez, Gineako Golkoreen kostaldeko oihanetan egindako euriaren ebapotranspiraziotik datorrela. Glaziazioan oihan horiek txikitu egin zirenez, hezetasun gutxiago birziklazen zen, eta horrek Saharako basamortua hegoalderantz hedatzen lagundu zuen.

SALBUESPEN HEZEAK AMERIKAN ETA ASIAN

Hala eta guztiz ere, Azken Glaziazioan ez zen idortasuna handitu leku guztietan, eta salbuespen garrantzitsu batzuk izan ziren.

Ipar amerikan, gaur egun erdi basamortu diren Arro Handiko eremu oso zabaletan (Nevada, Utah eta Arizona estatuak hartzen ditu) aintzira handiak egon ziren Azken Maximo Glaziarrean, eta haien ertzetan konifero-baso bakaneko landaretza hazten zen. Atmosferako zirkulazioan izandako aldaketa batek eremu hartako prezipitazioak ugaritu zituenean gertatu zen hori. Izotz-estalki handiek -berezikik Laurenditarrek- sortutako topografia berriaren ondorioz, mendebaldeko haizeen uhin-dura aldatu egin zen. Izotzeko domo ikaragarri hura Tibeteko mesetaren tamainakoa zen, eta Ipar Amerikatik igarotzean, bitan banatzen zuen mendebaldeko haizeen fluxu nagusia. Adar haie-tako batek, hegoaldekoak, Ozeano Baretik zetozten haizeak -eta haiekin lotutako ekaitzak eta fronteak- askoz ere hegoaldeagotik zeharkatzea eragiten zuen. Hala, Ipar Amerikako Arro Handian, kostaldeko Sierra Nevada mendikatearen eta barnealdeko Mendi Harritsuen artean, bi aintzira ikaragarri izan ziren, duela 30.000 urte eta 12.000 urteen bitartean: Lahontan eta Bonneville. Bi aintzira haieetatik gatzaga handiak eta txiki batzuk baizik ez dira gelditzen gaur egun (adibidez, Nevadako Pyramid Lake eta Uthah-ko Salt Lake).

Mendebaldeko haizeen ibilbidea hegoaldera mugitzeak gaur egun baino askoz hezeago bihurtzen zituen Sierra Nevada mendikatea eta Mendi Harritsuak, eta, hain zuzen, horietan egindako prezipitazioetatik elikatzen ziren aioatutako bi aintzira handiak. Estatu Batuetako hego-ekialdeko klima-aldaketa horiek aztertze-ko, inguru horretan bizi izan ziren karraskarien paleozuloak erabili dira. Karraskarien (batez ere, Ipar Amerikako Neotema genero-koak) babesteko eta kaka egiteko erabiltzen dituzten harkaitz-zuloetan daude paleozuloak. Klima lehorra denean, karraskarien pixa kristalizatu egiten da, eta zulo horietako landare- eta gorotz-hondarrak milaka urtez gordetzen dira. Hala, 2.500 paleozulo aztertu ondoren, Pleistozenoaren amaieran eta Holozenoan eskualde horretako landaretzak izandako aldaketei buruzko ondorioak atera eta datak zehaztu ahal izan dira. Hego Amerikako eskualde idor eta erdiidorreran ere paleozuloen antzeko azterketak egin dira berreziki.



Hego Amerikan, ekuatoretik hegoaldera dagoen eskualde tropikalean, hezetasuna gaur egun baino handiagoa zen glaziazioaren garaian. Titicaca aintzirako eta Uyuni-ko gatz-lautadako sedimentuek -Uyuni gatz-eremu oso zabala da, aintzina Boliviako goi-ordokia estali zuten antzinako paleoaintziren lekukoa- erakusten dute urak aise gaingitzen zuela gaur egungo arroa. Azken Maximo Glaziarrean Andeatiko aintzira horiek hedadura handiago zuten, ziurrenik, prezipitazioak ugariagoak zirelako. Glaziazio-garai hartan (duela 20.000 urte inguru) Hego hemisferioak zuen intsolazio handiagoak -% 8 handiagoa Kaprikornio tropikoan, ondoren, Holozenoaren hasieran (duela 11.000 urte inguru) baino- Amazoniako hegoaldeko udako montzoia indartzen zuen. Halaber, Azken Maximo Glaziarrean gaur egun baino hezetasun gehiago sartzen zen Atlantikotik Amazoniaren hegoaldera haize alisioek indar handiagoa zutelako, eta horrek Atlantikoko uren lurruntze txikiagoa -hotzagoak zirelako- konpentsatzen zuen. Peruko Junin aintziraren eta Titicaca aintziraren ondoko haranaren morrenetan egindako azterketen arabera, badiirudi glaziar haiek planetako beste leku batzuetakoak baino askoz ere lehenago iritsi zirela gehienezko hedadurara, hain zuzen, duela 34.000 urte inguru.

Aldiz, Andeen iparraldean, badiirudi Azken Glaziazioan zenbait glaziar ekuatorial txikitu egin zirela, prezipitaziak gutxitzearen ondorioz. Beraz, antza, horrek Amazoniaren iparraldea idorrago-rra zela dioten tesia indartzen du. Bestalde, Asian, udako montzoiek euri gutxiago ekartzen zuten. Izan ere, Asiako hegoaldean sortzen den eta Indiako Ozeanoko eta Ozeano Bareko haizeak erakartzen dituen udako behe-presio termikoa ez zen hain indartsua orduan. Aitzitik, Mongolian, gaur egun eta Holozenoan zehar basamortu izan diren eskualdeetan (Tengger basamortua, adibidez) aurkitutako aztarnak adierazten dute aintzira handiak izan zirela Azken Glaziazioan zenbait periodotan. Uste da periodo haiek -sedimentuen arabera, gaur egungoak baino hezeagoak eta gaur egungoak bezain beroak edo beroagoak- estadial arteko periodo beroren batekin batera gertatu zirela, eta haizeen zirkulazioa ere desberdina izango zela pentsatzen da (montzoi hezeen sarrera handiago).

HAIZEA

Glaziazioan zehar haizeak eta higadura eolikok indar handiagoa izan zuten latitude ertainetan eta goi-latitudeetan. Garai hartako hauts horixkako metaketa lodiek Ipar Europako eta, batez ere, Txinako eremu ikaragarri zabalak estaltzen dituzte. Groenlandiako eta Antartikako ice core-ek ere askoz hauts gehiago dute Azken Glaziazioan elurrei dagozkien geruzetan,

gaur egungo geruzetan baino.

Haizeak, paisaien idortasunak eta landare-estalduraren babestek ezak higadura eolikoa bultzatzen zuten. Aldi berean, aireko hautsa ugariak bi eratan eragin zezakeen klima glaziarra are gehiago hozteko: batetik, atmosfera askoz ere opakuagoa bihurtzen zuen eguzki-izpiekiko eta, bestetik, itsasoko urak emankor-rago bihurtzen laguntzen zuen. Izan ere, haizeak burdina garraiatzean, fitoplanktonaren produktibitatea handitzen zen eta atmosferako CO₂-a murriztu. Zergatik ote zebilen haize gehiago? Funtsean, izotzez estalitako goi-latitude-etan sortutako aire-masa hotzen eta izotzik gabeko latitude baxuagoetan sortutako aire-masen arteko kontraste termiko latitudinala handitu zelako.

Tropikoei dagokionez, badiirudi alisioen indarra handitu egin zela Ozeano Atlantikoan, baina ez Ozeano Barean Badiirudi Indiako montzoiak ere ahulagoak zirela glaziazio garairik hotzenetan (El Niño egoeretan gertatzen den bezala). Arabiako Itsasoan, Omango kostaldeko ur sakon- en azaleratzea (upwelling) eta Globigerina bulloides foraminiferoaren ugartasuna murriztu egiten zen estadialetan, eta handitu estadial arteko periodoetan (izan ere, montzoiak handiak direnean indartsu egiten da, eta, bestela, ahuldu).

Agian, glaziazioan elur-estalkia handiagoa izateak eta Tibet hozteak itsasoaren eta kontinentearen arteko gradiente termikoa murriztea eragin zuen, eta horrek udako montzoia geldiarazi zuen. Badiirudi azken bi milurtekoetan antzeko mekanismoak funtziona-

DESGLAZIAZIOA

Duela 20.000 urte 20.000 urte eta 18.000 urte bitartean izotza urtzen hasi zen Ipar hemisferioan, eta duela 8.000 urte inguru amaitu zen prozesua, izotzak egungoaren antzeko bolumenera eta hedadurara iritsi zirenean. Hala eta guztiz ere, baliteke, orduz geroztik, Antartikako mendebaldeko izotzaren zati batek duela gutxira arte urtzen jarraitu izana. Hala, Antartikaren kostaldeko zenbait izotz-plataformetan agetzen ari den atzerakada orain dela hoge mila urte hasitako desglaziazioen jarraipena izan diteke.

Azken desglaziazioaren hasierari buruzko galder askok erantzunik gabe jarraitzen dute oraindik. Lurraren bi muturretako izotzearen egindako zundaketek erakusten dute, batzuetan, Groenlandian gertatzen zena ez zettorrela bat Antartikan gertatzen zenarekin. Desglaziazioa Ipar hemisferioan Hego hemisferioan baino lehenago hasi zelako teoria kalikoa bera ere ez dago hain garbi. Izan ere, egiaztatuta dago estadial arteko periodo batzuetan, Antartika Groenlandia baino lehenago berotu zela. Halaber, badiirudi Andeatiko eskualde tropikalean Ipar hemisferioan baino zenbait milurte lehenago izan zela azken desglaziazioa. Dena dela, oraindik ere gehienek uste dute desglaziazioa Ipar hemisferioan hasi zela, eta Ipar Atlantikoan izandako aldaketak, berriz, berotze globala baino hamarkada batzuk lehenago etorri zirela. Hala geratu bazen, hau litzateke desglaziazioaren kausen eta ondoren segida posibleetako bat:



efektua eragiten zuen, eta horrek hotz handiagoa ekartzen zuen. Ozeano Bare tropikalean (Galapago uhartean eta Mindabaon), itsasoko uraren tenperaturei buruz egindako ikerketek adierazten dutenez, Ozeano Barearen ekialdean (zati hotzena) ura ez zen ia batere hoztu, eta mendebaldean (zati beroena), aldiz, 3 °C inguru hoztu zen. Paradoxikoki, badiirudi horrek esna nahi duela egoera barometrikoa eta haizeak. El niñoren ohiko egoera baten antzekoak zirela, hau da, alisioak ahulagoak, sakonera ertaineko ur gutxiago azaleratzea eta kontraste termiko txikiagoa Ozeano Bare tropikaleko mendebaldean eta ekialdearen artean.



Uda beragoak. Teoria klasikoaren arabera, izaera astronomikoko faktore hark abiarazi zuen prozesua. Udetan, Ipar hemisferioan goi-latitudeko eguzki-eradiak -duela 22.000 urte hasi zen handitzen, Milankovic-en zikloen arabera- areagotu egin zuen udako izotz-urtzea. Eta neguetan, Ipar Atlantikoko uren tenperatuark hotza izaten jarraitzen zuenez, ez zen nahikoa lurrin sortzen, Laurenditar eta Fineskandinaviar izotz-estalki kontinentaletako neguko elur-metatzeak udako

izotz-galtzeak baino txikiagoak izaten hasi ziren. Albedoa txikitzea. Izotz-estalkien hegoaldeko ertzak atzeraka egiten hastean, feedback-efektu garrantzitsua gertatu zen: Ipar Amerikako eta Eurasiako goi-latitudeetan, tundraren lekua hartzen ari zen baso borealak -batez ere, udaberrian eta udan- albedoa txikitu zuen, eta horrek urtearen zati argiko tenperatura igoarazi zuen.

Itsasoko izotz-bankisa murriztea. Eskualde subartikoetako udako tenperaturak igotzean, glaziazioan zehar itsasoaren eta airearen arteko isolatzaile termiko gisa jarduten zuen Artikoko izotz-bankisa murriztu egin zen. Gainera, izotza desagertzen zen lekuetan albedoa txikitzen zen.

Haizeen zirkulazio -aldaketak. Laurenditar izotz-estalki izugarriaren altuera murrizteak haize-lasterrak aldatu zituen, batez ere, latitude ertainetan. Ozeano Baretik Ipar Amerikara sartzen den haize-fluxuak oztopo txikiagoa zuenez, fluxu haren mendebalde-ekialde

Karbono dioxidoa

Karbono dioxidoaren kontzentrazioa ia 100 ppm handitu zen, eta horrek ere klima berotzen lagundu zuen. Desglaziazioan, 180 ppm-tik 280 ppm ingurura pasatu zen kontzentrazioa, hau da, 360 PgC-tik (karbono-petagramo) 560 PgC-ra (gaur egun, atmosferako karbono-gordailua 730 PgC-koa da).

Gehikuntza horrek 2,4 W/m2 inguru handitu zuen gainazaleko erradiazioa, zeinak eragin zuzena izan baitzuen 1 °C pasatxo igoera termiko globalean.

Ezinezkoa da desglaziazioan atmosferari gehitutako CO2-a kontinenteetako landare-gordailuak etortzea, lurzoruek eta Lurreko biomasak karbono gehiago atxikitzen baitzuten. Kalkuluen arabera, Azken Maximo Glaziarrean lur kontinentalen gordailuetan (lurzorua eta landareak) atxikitako karbono-kantitatea gaur egungoa baino 800 Pg inguru txikiagoa zen. Hala, desglaziazioan, oihaneko landaretza-eremuak hedatu, eta sabanak eta basamortuak txikitu egin ziren. Goi-latituteetan eta latitude ertainetan, zuhaitzerako landaretzak kolonizatu zituen lehen izotztua zeuden edo tundra-landaretza pobrezia zuten lurak. Beraz, desglaziazioan, landaretza kontinentalak CO2-a bildu zuen, eta,hala, landaretza horren biomasa nabarmen handitu zen.

Salbuespen batetik: itsas maila igoztean urpean gertatu eremuak. Teoria berri baten arabera, agian, lurzoruan eta urperatutako eremu horietako landareetan atxikitako karbonoarekin handitu zuen, neurri handi batean, atmosferako CO2-aren kantitatea. Kalkuluen arabera, plataforma haietako landareak eta lurrak urpean geratu eta deskonposatzen, karbonoa askatu zen, eta, ondorioz, baliteke atmosferako CO2-aren kontzentrazioa 90 eta 120 ppm artean handitzea. Dena den, teoria hori oso berria da oraindik, eta ez dakigu urpean zegoan karbono biologikoaren zer proportzio pasatu zen airera.

Beraz, badiudi atmosferako karbonoak izandako gehikuntzaren zati handiena ozeanotik etorri zela. Bi transferentzia-prozesu



hauek gerta zitezkeela uste da (glaziazioaren hastapenean gertatutakoen alderantzizkoak):

Aireztzte ozeaniko handiagoo, CO2 askoko ur sakonen azaleratze handiagorekin.

Itsasoko fitoplanktonak atmosferako CO2 gutxiago biltzea fotosintei bidez.

Paradoxikoki, bi prozesu horiekkontraesankorak dira, zeren, bate-tik, ur sakonen azaleratze handiagoo esan nahi du CO2 gehiago askatzen dela airera, eta, bestetik, ur horiek mantenugai gehiago -eta, beraz, fitoplankton-ekoizpen handiagoo- izaten dute, eta horrek kontrako ondorioa sortzen du, hots, ozeanoak CO2 gehi-ago xurgatzea. Eta alderantziz. Beraz, ez da samurra jakitea bi prozesu horietatik zein nagusitu zen eta nola aldatu zen horien indarra desglaziazioak iraun bitartean.

Ozeano-zirkulazioari buruzko eredu berriek adierazten dute, agian, aireztate ozeanikoa izan zela garrantzitsuena, bereziki, Antartikatik gertuko hegoaldeko itsasoetan. Izotz-bankisen atzerakadak, itsaslasterren fluxu termohalinoa handitzeak eta ur sakon gehiago azaleratzeak aireztatu egin zuten ozeanoa, eta, hala, glaziazioan zehar uretan atxikitako CO2-aren zati bat atmosferara askatu zen.

Halaber, baliteke Ozeano Bare ekuatorialean ere CO2-aren aireztatze-eredua aldatzea. Gaur egun, eremu horretan askatzen da CO2 gehien atmosferara (1 PgC/urte inguru). Nagusiki, ekialdean gertatzen da hori, upwelling handieneko eremuan. Glaziazioko garairik beroenetan -estadial arteko periodoetan- badiudi maizago gertatzen zirela La Niña egoerak eta CO2 gehiago askatzen zela Ozeano Bare ekuatorialean. Agian, gauza bera gertatu zen desglaziazioko milurtekoetan ere, batez ere, Bolling-Allerad aldian.

Azkenaldian uste da glaziazioan zehar karbono-kantitate handia atxikiko zuen permafrosta urtzean ere askatuko zela, agian, CO2-a. Zimov ikerlari errusiarraren arabera, gaur egun, karbono gehiago dago permafrostean landareetan (650 Pg) baino, eta lurzoruetan (1.500 Pg) baino pixka bat gutxiago. Glaziazioan horren bikoitza baino gehiago atxiki zezakeen permafrostak, eta, desglaziazioan, karbono hura deskonposatzen, karbono dioxido eta metano modura aska zitekeen. Halaber, baliteke, neurri batean, atmosferaako metanoaren oxidazioaren ondorioz ugaritzea CO2-a. Izan ere, CH4-a OH erradiakalekin konbinatzen da atmosferan, et CO2-a eta ura sortuz suntsitzen da.

Metanoa

Metanoaren kontzentrazioa bikoiztu egin zen desglaziazioan, eta 0,4 ppm-tik 0,7 ppm-ra igaro zen. Bikoizte horrek erradiazioaren 0,3 W/m2-ko hazkundera eragin zuen zuzenean; hortaz, berez, gradu-hamarren gutxi batzuetako igoera termikoa bakarrik egotz dakioke gehikuntza horri, zeharkako beste efektuak kontuan izan gabe.

Beraz, oraindik ez dago garbi zer dela-eta handitu zen aireko metano-kantitatea. Agian, goi-latituteetako eskualdeetan dago giltza, eta ez eskualde tropikalean. Izan ere, goi-latituteetan hezegune berriak eratu ziren, izotzak atzera egin zuen lekuetan (Kanadan, Siberian eta Ipar Europan, bereziki). Gainera, itsas maila igoztean eta urak kostako eskualde polarrak estaltzean, permafrost-eremu zabalak urtu egingo ziren eta zorupeko izotz-kristaletan harrapatua zegoen metanoa askatu egingo zen.

Bestalde, aireko OH erradikalen murrizketa ere atmosferako metano-kontzentrazioa handitzearen faktore garrantzitsua izan daiteke, erradikal horiek CH4 molekula oxidatu eta suntsitzen baitute. OH erradikalen murrizketa hori KOL edo konposatu organiko lurrunkor batzuk, hala nola isoprenoak eta monoterpenoak, ugaritzean gertatuko zen; basoek airera isirtzen dituzten ousaintsuak dira konposatu horiek, eta OH erradikalak kontsumitzen dituzte. Alegia, zuhaitz-erako landaretzaren ugaritzeak ere metano-kantitatea handitzen lagundu zuen.

Oxido nitrosoa

Desglaziazioa zehar atmosferan zuen kontzentrazioa handitu zuen beste berotegi-gas bat oxido nitrosoa izan zen; hain zuzen, 0,19 oom-tik 0,27 ppm-ra aldatu zuen. Handitze horrek 0,3 W/m2-ko erradiazio-behartzet zuzena eragin zuen, metanoaren oso antzekoa. Lurzor tropikal eta epelak eta ur sakonak azaleratzen diren eremu ozeanikook dira oxido nitrosoaren iturri nagusiak. Oxido nitrosoaren hustuleku nagusia, beriz, estratosfera da, non beste konposatu batzuetan fotodisoziatzen baita. Metanoaren kasuan bezala, oxido nitrosoaren aldaketak ere bat datoz desglaziazioan tenperaturek izandako bilakaerarekin.

Lurruna

Eta, bukatzeko, faktorerik garrantzitsuena: airearen tenperatura igoztean atmosferako lurrun-kantitatea handitu egin zen, eta horrek eragin nabarmena izan zuen berotegi-efektua indartzean eta klima berotzean.



ITSAS MAILAREN IGOERA

Esan bezala, azken desglaziazioan itsasoaren maila igo egin zen, batez ere, kontinenteetako izotzak urtzearen ondorioz. Baina igoera hura ez zen eritmo uniforme gertatu, eta ez zitzaion egokitu Ipar hemisferioko udako eguzki-erradiazioaren hazkunde-kurbari. Karibeko Barbados uharteko eta Ginea Berriko Huongo koral-terrazen azterketak adierazten duenez, desglaziazioko itsas mailaren igoera-eritmoa -120 metrotik gorakoa- ez zen izan lineala. Azterketa horiez gain, kostaldeko sedimentuen bilakaerari buruzko zenbait azterketa egin berri dira, eta, datu guztiak bilduta, hiru uetxaldi-pultsu nagusi bereizten dira.

Dirudienez, Australiako plataforma ozeanikoko eta Irlandako itsasoko sedimentuetan egindako azterketek adierazten dute desglaziazioa bat-batean hasi zela duela 19.000 urte. Hala, lehenengo urtxaldi-pultsu handia gertatu zen, eta itsasoaren maila 10 metro igo zen ehunka urte gutxi batzuetan, Europan Oldest Dryas deitzen zaion aldi hotzaren hasieran. Igoeraren eritmoa 50 mm/urte ingurukoa izan zela uste da. Agian, Antartikaren hasierako urtze-prozesu batek itsaslasterren zirkuitu termohalinoa aldatu zuen, eta horrek eragina izan zuen Ipar hemisferioan ere. Hala, ur sakonen ekoizpena handitu, Golkoko itsaslastera indartu eta Ipar Atlantikoa berotu egin zen. Be-10aren azterketen arabera, Poloniako eta Baltikoko herrialdeetako morrenek atzerakada handia izan zuen, eta horrek adierazten du Finoeskandinaviar izotz-estalkia asko urtu zela.

Barbadosen koralak adierazten duten igoera- eritmoaren arabera, urtze-eritmo biziko beste bi aldi labur bereizi izan dira. Lehenangoan 20 metro inguruko igoera izan zen, eta Bolling-Allerad berotzearen lehen partean gertatu zen (duela 14.200 eta 13.700 urteen bitartean, gutxi gorabehera). Itxura denez, Antartikaren urtze partzialak eragin zuen igoera hura. 500 urteko epean gertatu zen igoera, eta oso eritmo azkarrean (40mm/urte).

Bigarrena garrantzi txikiagoa izan zen, eta duela 11.000 urte inguru gertatu zen, Younger Dryas-en amaierako eta Holozenoaren hasierako berotzearen ondoren. Bi urtze-maximo horien artean igoera-eritmo apaleko garai bat izan zen, urtean 3 mm, Younger Dryas hain zuzen ere.

Ez dakigu zehatz-mehatz desglaziazioan zergatik gertatu ziren hiru urtxaldi-pultsu handi eta itsas mailaren igoera haiek. Zientzialari batzuek espekulatu dute, agian, Finoeskandinaviar izotz-estalkia urtzearen (lehenengo gertatu zen) eta Laurenditar izotz-estalkia urtzearen (geroago izan zen) arteko desfasearen ondorioa direla. Uste da Antartika urteak ere lagunduko zuela batez ere, igoeran. Baina oraindik ez dago garbi zein hurrenkaretan eta zein modutan lagundu urtze-iturri bakoitzak itsas mailaren igoeran halako aldaketa handiak gerta zitezen.

FASEAK ETA DESFASEAK ARTIKOAREN ETA ANTARTIKAREN ARTEAN

Azken desglaziazioiko tenperatura-igoera ere ez zen gertatu modu linealean, ezta aldi berean ere. Groenlandiako eta Antartikako tenperaturen bila-kaera-kurbek- izotzen azterkerengatik ezagutzen ditugu- aldakuntza nahiko desberdinak dituzte. Groenlandian, duela 14.700 urte inguru igo zen tenperatura, batez ere, eta hamarkada bakan batzuetan ia gaur egungoaren mailako batez besteko baliora iritsi zen. Urteko batez besteko elur-kantitatea bikoiztu egin zen bat-batean, 10 cm/urte-tik 20 cm/urte-ra, Summit-en egindako zundaketaren arabera. 10-50 urte eskaseko bat-bateko berotze horren ondotik, zeharo aldatu zen joera berriro Groenlandian, eta milaka urte batzuetan, pixkana-ka hotzera itzuli zen. Garai hartako aldirik hotzenean -duela 12.200 urte eta 11.500 urte bitartean- tenperaturak egungoak baino 15 °C hotzagoak izaera heldu ziren, eta urtebeteko elurra- ren lodiera 10 cm ingurura jaitsi zen, berriz ere. Younger Dryas ize- neko hozte-aldi hura ere bat-batean amaitu zen duela 11.500 urte, hain zuzen, tenperaturak behin betiko igo eta glaziazioa amaitu zenean.

Ipar Atlantikoan eta Europan desglaziazioaren erritmoa Groenlandiakoaren antzekoa izan zela uste da. Lehenengo sintomal duela 19.000 urte agertu ziren, hain zuzen, lehenengo urtze handiaren ondoren, zirkulazio termohalinoa oso geldotuta zegoenean.

Azterketa polinikoen eta aintziretako sedimentuen azterketen ara-bera, Oldest Dryas izeneko glaziazioaren azken aldi hotza zen, eta duela 19.000 urte eta 14.700 urteen artean gertatu zen. Fase hartan, Ipar Atlantikoko icebergen amiltze masiboko Heinrich-1 aldia izan zen. Horrekin batera, urak asko hoztu ziren, Portugalen hegoaldeko kostaldean egindako zundaketen arabar. Oldest Dryas fasea Azken Maximo Glaziarren ondoren gertatu zen, eta, berez, tenperatuak altuagoak izan ziren arren, Portugalgo urak hotzago egon ziren.

Duela 14.700 eta 13.000 urteen artean, Bolling-Allerad izeneko bat-bateko berotzea gertatu zen, eta, garai hartan, tenperaturak altu mantendu ziren. Europako polen-aztarnategi ugariak erakusten dutenez, Oldest Dryas-eko belarrez eta zuhaixkez osatutako flora glaziarra klima epeleko zuhaitz-erako landaretzak ordezkatu zuen Bolling-Allerad garaian. Hala ere, aldi bero hartan izan ziren zen- bait aldi aldi hotz labur ere.

Duela 13.000 urte inguru, aldi nahiko egonkor eta hotz bat hasi zen ia bat-batean: Younger Dryas, eta duela 11.500 urte arte iraun zuen. Aldiaren izena *Dryas Octopetala* lan- daretik dator. Lore hori argiak dituen landarea da, tundran ohikoa dena, eta Europaren hegoaldeko eskual- deetan agertu zen berriz ere. Ondoren, xeheago aztertuko dugu aldi hori.

Antarkikoko erritmoa, ostera, desber- dina izan zen. Tenperatura duela 18.000 urte inguru hasi zen igotzen, hau da, Ipar hemisferioan nabarmen igo baino lehenago. Ondoren, igoera hura eten egin zen duela 14.000 urte inguru, eta hozte txiki bat gertatu zen. Antarctic Cold Reversal izneko hozte hura ez zen izan Groenlandia- koa bezain handia, eta Younger Dryas baino lehenago amaitu zen, duela 12.500 urte aldera, tenperatu-



Dryas Octopetala-ren loreak.



rak gora egin baitzuen berriro.

Zeelanda Berriko zohikaztegi batean berriki egindako azterketa poliniko baten arabera, itxuraz, mila urte inguruko hozte bat izan zen leku horretan, duela 13.600 urte hasita, hau da, iparraldeko Younger Dryas goieneko mailara iritsi baino lehen. Groenlandiako izotzek eta Antartikako izotzek adierazten dutena- ren arteko desfase horiek nahiko misterioitsuak dira oraindik ere, eta uste da, agian, zirkulazio termohalino atlantikoaren aldaketak eta izotzak urtzean sortutako ur gezak polo batean eta bestean eragiten zituen efektu termiko desberdinengatik gertatzen zirela. Baina eredu numeriko guztiek ez dute adierazten zirkulazio ter- mohalinoaren aldaketek eragiten zutenik bi poloen arteko desfa- sea. Hala, zenbait arabera, Antartika barruko zundaketen datazio batzuk gaizki egin dira elur oso gutxi dagoelako, eta elur ugari-ko kostaldeko beste zundaketa batzuetan (Law Dome-koa esatera- ko) askoz datazio zehatzagoak egin dira, eta emaitza desberdinak lortu dira. Horien arabera, aipatutako bipolar seesaw fenomeno- a ez dago batere argi.

YOUNGER DRYAS

Duela 12.900 urte inguru, Bolling-Allerod berotzearen ondoren, Europako klima aldi oso hotz batean sartu zen berriro: Younger Dryas. Dryas izena *Dryas Octopetala* landaretik hartu zen. Izan ere, tundran ohikoa den lore hori argino landare hori Europaren hegoaldeko lurretan azaldu zen berriz ere, zuhaitzak desagertu eta landaretza oso pobrea berrezarri zenean. Hala, Europako neguko tenperaturak oso baxuak bihurtu ziren, berriz ere, Younger Dryas-en. Hori adierazten dute hainbat azterketa poliniko sedi- mentarioek, baita beste mota batzuetako azterketek ere.

Younger Dryas deitutako hotzaldi hori bat-batean hasi zen -harridura sortzen du horrek oraindik ere-, eta, amaitu ere, bat-batean amaitu zen, duela 11.600 urte inguru, bahin beti-ko igoera termikoa gertatu zenean eta Iparhemisferioan Borealaurreko aldia eta, harekin, gaur egungo gla- ziazio arteko aldia -Holozenoa- hasi zenean.

Espekulazio ugari egin dira Younger Dryas aldian Europan nagusitu zen neguko hotz handiari buruz. Berora ohitu berri ziren gure Europako arba- so paleolitikoak ustekabean harapa- tuko zituen seguru. Agian, eremu bat- zuk hotzaren gordintasunetik libratu ziren. Hala, baliteke Europaren hego- ekialdeko zatia (gaur egungo Kantabria, Euskadi eta Akitania) Europako babestu bihurtzea anima- lientzat eta gizakientzat, klima epela-

goa baitzen hego- haizearen maiztasun handiagoari eta neguko foehn efektuari esker.

Garai hartan, Younger Dryas-en hasieran (duela 12.900 urte) Ipar hemisferioko udako intsolazioa egungoa baino handiagoa zen Milankovic-en azterketaren arabera, eta handituz zihoan (uste da maximora duela 11.000 urte inguru iritsi zela). Beraz, ez zegoen arrazoi astronomikorik, bat-batean, udako urtea mantsotu eta, berriz ere, glaziarrek hedatzen hasteko; kontrakoa baizik.

Hoztearen giltza beste lekuren batean egon zen seguruenik; agian, Atlantikoan. Dakigunez, Atlantikoko itsaslastarren sistema bat-batean ahuldu zen Bolling-Allerad-etik Younger Dryas-erako trantsizioan, eta glaziazioaren garai hotzaren antzeko egoerara itzuli zen. Hala, Atlantikoko azaleko ur polarrak hegoaldera egiten hasi ziren, Iberiar penintsularen latituderaino. Golkoko itsaslaster- ra eta Jito iparratlantikoa garraiatzen ur epelek, berriz, apenas lortzen zuten penintsularen latitudera iristea.

Ur hotzen hegoaldeko inbasio horren aztarna asko daude itsaso- an. Adibidez, Lisboaiko kostaldeko itsas sedimentuetan aurkituta- ko mikrofauna fosil-motak 10 °C hoztea adierazten du ura- ren tenperaturan. Halaber, latitude ertainetan ur polarre- tako foraminiferoak (adibidez. Neoglobobulimina pachyder- ma) argi adierazten du Atlantikoa hoztu egin zela. Azkenik, iceberge- garraiatu- tako eta nahiko behe-latitude- etako itsas hondoetan meta- tutako higakin terrigenoek adierazten dute uraren tenpe- ratura asko hoztu zela duela 12.900 eta 11.600 urteen artean.

Zirkulazio termohalinoa ahul- du ondoren, albedoaren fak- toreak ere hozte-prozesua areagotuko zuela uste da.

Albedoa da espazioan islatu eta gaitzen den eguzki-argiaren ehu- nekoa. Itsasoko ura partzialki gatzgabetzeak Ipar hemisferioko itsasoan izotz islatzaile gehiago sortzen lagundu zuen, horri esker, errazago izozten baitzen. Bestalde, uste da prozesu hura neguan indartu egingo zela, duela 11.000 urteko neguetan, Ipar hemisfe- rioko intsolazioa gaur egungoa baino dezente baxuagoa baitzen. Wallace Broecker ozeanografoak fenomenoaren hasierari buruz landutako hipotesia izan da, orain arte, onartuena. Horren arabe- ra, desglaziazioaren hasieran, Bolling-Allerad izeneko lehenengo aldi beroan, Laurenditar izotz-estalkio izotzaren urtze progresibo- ak ur gezako aintzira handi bat sortu zuen estalkiaren hegoaldeko ertzean (Agassiz aintzira), gaur egun, Ipar Amerikako aintzira handiak dauden tokitik mendebaldera. Aintzira hark iteera bat zuen hegoalderantz, Mississippi ibaitik, eta ur geza haien Mexikoko Golkon itsasoratzen ziren.

Baina, ia bat-batean, aintziraren ekialdeko izotz-hesi bat urtu egin zen. Hesi hark aintziraren eta Ipar Atlantikoaren arteko komunika- zioa eteten zuen, baina, hesia haustean, ur gezak Atlantikoan itsa- soratzen hasi ziren, Saint Laurent kanaletik, Mississippiko bidea hartu beharrean. Ipar Atlantikora iristen zen emari hura, zenbait hamarkadatan, gaur egun Amazonas ibaiak duena baino handia- goa izan zela uste da. Horren ondorioz, itsasoko uren gazitasuna eta azaleko uren dentsitatea murriztu egin ziren bat-batean, eta horrek sakoneko uren hondoratze- eta ekoizpen-prozesua geldia- razi zuen. Sistema termohalinoa (batzuetan, MOC, Meridian Overturing Circulation edo "*hegoaldeko zirkulazio itzulikaria*") dei- tzen zaio) ahuldu egin zen, beraz, eta, harekin batera, Golkoko itsaslastera eta Jito iparratlantikoa ere bai. Hala, Ipar Atlantikoa mila urtetik gora iraun zuen hozte-aldi luze batean sartu zen berri- ro: Younger Dryas.

Hala eta guztiz ere, ez da urpetze handi horren froga geologikorik aurkitu. Teoria horrek dioena gertatu balitz, lurak higatu eta arroi-

la bat sortuko zen, Agassiz lakuan sortu eta Atlantikoan itsasora- tuko zen ibaiak eginda.

Halaber, baliteke Fram-eko itsasertetik -Spitzbergen eta Groenlandia artean- Artikoko ur geza gehiago iristea Atlantikora, eta horregatik handitzea Atlantikoaren iparraldeko ur gezaren kan- titatea. Gaur egun, Artikotik datorren itsas izotzeko itsaslaster indartsu bat pasatzen da itsasarte horretatik hegoaldera, batez ere, neguan. Agian, Younger Dryas-en, Artikoa ur geza jasotzen zuen, Ipar Amerikako izotz-estalkiaren mendebaldeko izotza ur- tzearen eraginez (Keewatin eskualdea), eta, halaber, behar bada Hudson badiatik ere urtutako ur asko isuriko zen. Ur geza hura guztia Ipar Atlantikora garraiatzen zen Fram-eko itsasertetik, eta horrek zirkulazio termohalinoa gerarazten zuen.

Yunger Dryas-eko hozte-aldia oso nabarmena izan zen Europan. Fenomeno globala izan ez arren, ez ziren Ipar Atlantikoko ur oze- anikoak bakarrik hoztu; hainat aztarnek erakusten dute beste hainbat eskualde eta latituderi era eragin ziela, Argentinako Patagoniatik hasi, eta Filipinetako Sulu itsasora arte.

Younger Dryas-eko hoztea fenomeno oso orokorra izan zela adierazten du atmosfe- rako metanoaren kontzen- trazioak ere. Izan ere, % 25 murriztu zen, eta datu hori aldi berean erregistratuta dago Groenlandiako eta Antartikako izotzetan (aintzi- tik, karbono dioxidoak ugarit- zen jarraitu zuen, tenperatu- rak behera egin arren...).

Duela gutxira arteko uestea- ren arabera, hotzak prezipi- tazioak gutxitu eta, horren ondorioz, eremu tropikaleta- ko hezeguneak txikitzean gertatu zen metanoaren murrizketa. Baina, behar bada, beste nonbait aurkitu

behar da metanoaren murizketaren kausa nagusia; goi-latitude- tan, agian. Hain zuzen ere, latitude horietan, hotzak jarduera bio- logikoa murriztuko zuen, eta, ondorioz, metanoaren ekoizpena gutxituko zen tundrako eta zohikaztegi- tateko ekosistemetan. Hotza itzuli arren, itsasoaren maila ez zen jaitsi, baizik eta igotzen jarraitu zuen pixknaka (3 mm/urte; Bolling-Allerad garaia- ren hasie- rako urteko 40 mm-ko igoerarekin kontrajarririk). Horrek esan nahi du kontinenteetan metatutako izotzak urtzen jarraitu zuela, Europako zenbait eskualde- tateko glaziarrek berriro aurrerakada garrantzitsuak egin zituzten arren. Hala, Younger Dryas-en, ia Eskozia guztia izotzaren azpian geratu zen, eta zanbait aztarnek adierazten dute Suitzako Alpeetako elur iraunkorren maila gaur egun baino 300 metro beherago jaitsi zela, beriz ee.

Younger Dryas bat-batean hasi bazen, eta are bortitzago amaitu zen. Izan ere, duela 11.500 urte inguru, 10 °C-rainoko igoera ter- mikoa izan zen Groenlandian dozenaka urte batzuetan. Halaber, Europan, zenbait aintziratako sedimentuek erakusten dutenez (Poloniako Gosciaz, Suitzako Gerzensee eta Alemaniako Ammersee), gutxi gorabehera, garai berean amaitu zen Younger Dryas; agian, Gronelanian baino urte batzuk geroago. Groenlandiako Summit-eko elurraren metatze-kurbak ere Younger Dryas bat-batean amaitu zela erakusten du. Hamamaka urte gutxitan, 100 mm-tik 200 mm-ra igo zen urtean egindako batez besteko prezipitazioa. Metanoaren kontzentrazioa ere 0,50 ppm-tik 0,75 ppm-ra zen 200 urteko epe laburrean.

Horrenbestez, itsaslaster ozeanikoak gaur egun ezagutzen dugun moduan funtzionatzen hasi ziren, duela 11.500 urte. Ipar Atlantikoko azaleko urak berotu egin ziren ostera, eta, hamarkada gutxi batzuetan, tenperaturak zenbait gradu igo ziren, batik bat, Europan. Hala, Pleistozenoa amaitu, eta aldi epel bat hasi zen, Holozenoa, zeinak *Homo sapiens* kobazuloetatik irten, hazi eta ugal zedin ahalbidetu baitzuen.



GRÁFICAS **RD**



Impresión Offset

Impresión Digital

Fotografía

Cartelería

Velocidad

Tu imprenta de confianza



C/ IRUÑA, 1 BIS, 2ª PL.- BILBAO

✉ info@graficasrd.com

☎ 94 447 93 04

💻 www.graficasrd.com