

Klimatologia fisikoa, klima sistema eta etorkizunean itxaron daitekeen bilakaera

Jon Sáenz Agirre

Fisika Aplikatua II Saila, Zientzia eta Teknologia Fakultatea (UPV/EHU)

Iñigo Errasti Arrieta, Gabriel Ibarra-Berastegi

Ingenieritza Nuklearra eta Fluidoek Mekanika Saila (UPV/EHU)

Agustín Ezcurra Talegón

Fisika Aplikatua II Saila, Farmazia Fakultatea (UPV/EHU)

Laburpena: Hasieran, gaur egungo klimatologiaren garapena aurkeztuko dugu, historia labur moduan, eta adieraziko da zelan sortu zen klima-sistemaren kontzeptua. Ondoren, negutegi efektuaren atzean dagoen teoria-oinarri aurkeztuko da. Oso teoria-eredu bakun baten bidez frogatuko dugu irradiazio infragorriko eguratsuko xurgatzaileen kontzentrazioak gora egiten badu, gainazaleko tenperaturak ere gora egin behar duela. Gainera, barne berrelikadurako zikloa edo biziraupena bezalako kontzeptu garantzitsuak azalduko ditugu. Klima ereduaren teoria-oinarria eta egitura aurkeztuko ditugu azalean, eta adieraziko dugu zeintzuk diren Klima Aldaketari buruzko Gobernuarteko Taldeak bere txostenetan erabiltzen dituen ereduak. Ondoren, isuriaren agertokiak definituko ditugu eta horien arabera espero ditzakegun planeta mailako aldaketak ere azalduko dira; Euskal Herriko mailan ere erakutsiko ditugu, isuriaren agertoki eta eredu batzuen arabera.

Abstract: We present a brief historical review of the main developments in modern climatology and the climate system. Next, a summary is presented about the basis of the greenhouse effect and the way the absorption of infrared radiation by the atmosphere produces an increase in surface temperature by means of a very simple conceptual model. Additionally, some important concepts such as feedback cycle, greenhouse gases or atmospheric lifetime are introduced. The structure and the basis of climate models is presented for laymen, together with the type of climate models that are being used by the Intergovernmental Panel on Climate Change in its assessment reports. Finally, the concepts behind emission scenarios are presented, leading in the end to a brief evaluation of some climate models' results over Euskal Herria, according to different emission scenarios.

SARRERA

Duela ehun bat urte, XIX. mendeko bukaeran eta XX. mendeko hasieran, klimak sailkatzea zen klimatologiaren helburu nagusia. Hala ere, XX. mendean zehar hainbat jakintza arlotan lortutako zientzia-aurkikuntza batzuen ondorioz, klimatologiaren asmoak nabarmenki zabaldu dira.

Alde batetik, meteorologiaren munduan, garapen nabaria ekarri zuen Vilhelm Bjerknes norvegiarrak 1905. urtean aurkitu zuenak: eguraldiaren iragarpena hasierako balioko iragarpenaren arazo bat baino ez zen. Berak identifikatu zituen erabili beharreko funtsezko lege fisikoak: momentu lineala, energia eta masaren kontserbazioa eta egoera-ekuazioa. Hala ere, garai horretan ez zegoen modurik iragarpena praktikan jartzeko. Lewis F. Richardson britaniarra (1922) izan zen gaurko klima ereduen beste aitzindaria. Berak plazaratu zuen eguraldiaren-aurreikuspena egiteko lehen zenbakizko prozedura. Hainbat urte geroago, teoriaren aurrerakada nabarien ondoren eta ENIAC ordenagailuari esker, Charneyk, Fjortoftek eta von Neumannek (1950) eta Phillipsek (1956) zenbakizko eguraldi-iragarpen baliotsuak garatu zituzten lehendabiziko aldiz. Honek jarri zuen gaur egungo klima ereduen benetako oinarria, eta ordutik hona asko garatu da meteorologia dinamikoaren esparru hau. Hala ere, energiaren fluxu erradiatiboak ez ziren halako ereduatan agertzen urte horietan, eta hurrengo urteetan agertuko ziren, teoria garatzen zen heinean. Halako teoriak beste fisikari batzuek garatu zituzten, XX. mendean zehar, hasieran izarrak aztertzeke eta, ondoren, Lurraren eguratsean eguraldia iragartzeko.

Harald Sverdrup eta beste ozeanografo fisiko batzuen lanak funtsezkoak izan ziren XX. mendearen erdian ozeanoetako zirkulazio orokorraren eragileak ulertzeko: tenperatura eta gazitasunengatik dauden dentsitate-aldaketak edo haizeek goiko gainazalean marruskaduragatik eragiten duten arrastea, lurraren errotazioarekin batera. Handik gutxira (1957-1958) Nazioarteko Geofisikako Urtea (*International Geophysical Year*) ospatu zen, eta bertan hartutako neurketei esker, meteorologia eta ozeanografia fisikoen arteko loturak zehaztu ere, bereziki *El Niño-Hego Oszilazioa* delakoan. Hau, garrantzi handikoa da munduko klima-aldakortasun naturalean. Ez dago klimaren iragarpenik egitea ozeanoa kontutan hartu gabe.

Beste jakintza arloetan ere, aurkikuntza handiak egon dira azken mendean zehar. Beste bat aipatzearren, geokimika aukeratu dugu. Charles Keeling 1958an hasi zen karbono dioxidoaren kontzentrazioak neurtzen Mauna Loako Behatokian (Hawaii). Hans Suessen karbonoko isotopoei buruzko lanek argi eta garbi adierazi zuten karbono dioxidoaren kontzentrazioaren aldaketak ez zirela naturalak, erregai fosilen errekuntzaren ondorio bat baizik. Geokimikaren aurrerakadek ere, beste emaitza garrantzitsu batzuk ekarri dizkigute negutegi efektuko gasen kontzentrazioko neurketei buruz,

Hego Poloan edo Groenlandian atera dituzten laginetako gasen azterketatik. Badakigu egungo karbono dioxidoaren kontzentrazioa handiagoa dela aurreko 800.000 urteko beste edozein aldiunetakoa baino.

Geologiak lan gogorak egin zituen aintzineko aroetako paleogeografia aztertzeko, kontinenteak zelakoak ziren, eta non zeuden kokatuta. Paleoklimatologoek aintzineko glaziazioak eta glaziazio arteko tartekak identifikatu dituzte eta astronomiaren aldetik, eguzkiaren orbital-parametroetan ikusi dituzte horien eragileak. Egun badakigu betidanik egon dela aldatzen klima, baina badakigu era berean eragileak desberdinak izan direla iraganeko glaziazioetan eta egungo klima-aldaketan.

Oinarrizko zientzietako neurketak eta teoriak garatzeaz gain, ezinbestekoak izan dira klimatologiaren garapenean teknologia-aurrerapen batzuk, sateliteen bidezko neurketak besteak beste.

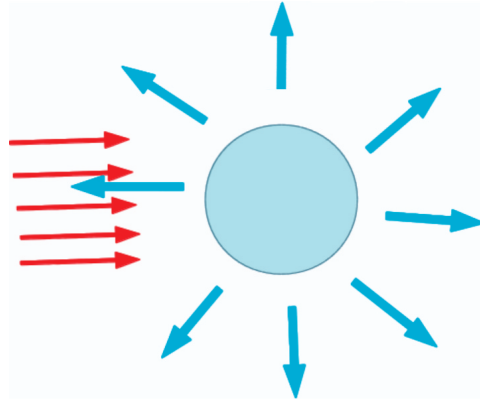
Izan ere, sateliteen bidez neurtzen dira gaur egun gainazaleko tenperaturak, eguratseko tenperaturaren soslai bertikala, ozeanoetako maila, gainazaleko haizeak eta beste hainbat aldagai. Neurketa hauek Lurra osora zabaltzen dira, nahiz eta hainbat tokitan behatzailerik ez egon. Beraz, sateliteen bidez lortu da neurketen multzo handia. Konputagailuen garapena izan da bigarren teknologia-aurrerapena teknologikoa, honek gauzatu baitu data multzo erraldoi horren tratamendua. Interneten garapenak (orokorrean, komunikazioen garapenak) erraztu du datu-base horiek edozein ikertzailearen eskutian egotea, eta, ondorioz, teoriak aurrera egin dute baliabide horien eskutik.

Beraz, zientzia eta teknikako iraganeko hainbeste ahaleginei esker gaude egun klima-aldaketari buruzko ikerketa egiten, ez baita gaur egungo ideia berria, azken mendeko zientziaren garapenaren ondorio bat baizik [1]. Hori guztia dela-eta, egun klimatologiak beste ikuspuntu bat dauka: Klima-sistema du ikusmiran. Klima-sistema honetan eguratsa, ozeanoa, kriosfera, biosfera edo litosfera klima-sistemako azpisisistemak dira [2]. Azpisisistema hauek, elkarrekin trukutzen dituzte materia momentua edo energia-fluxuak. Materia-fluxuen artean lurrunketa, euria edo lurretik aireak altxatutako aerosolak ditugu. Momentu-fluxua haizeak lurraren edo ozeanoaren gainazalaren gainean eragindako marruskadura da. Azkenik, gainazala eta eguratsaren arteko energia-fluxuen multzoan adibide bi aipatuko ditugu: uraren lurrunketarekin batera ozeanotik beroa garraiatzen da eguratsera edota lurraren gainazalak izpi infragorrien igorpenaren eta xurgapenaren bidez energia trukutzen du eguratsarekin. Edozein klima eredu-tan, lehen aipaturiko kontserbazio-legeak erabiltzen dira, azpisisistemaren arteko elkartrukeak ekuazio matematikoen bidez adierazteko. Era horretan, kontuan har ditzakegu azpisisistemek elkarrekin trukutzen dituzten fluxuak eta kanpoko eraginak (esaterako eguzkiaren irradianziaren aldaketak edo sumendiek isuritako aerosolen kontzentrazioa); horrela, hasierako baldin-

tzak ezagutzen baldin baditugu, badago etorkizuneko egoeren banaketa estatistikoa iragartzea. Klima auresatean, klima-sistemaren izaera kaotikoagatik, ez dago auresankortasun deterministarik, baina klima auresatea aldagaien probabilitate-dentsitatearen funtzioa iragartzea da.

BEROTEGI EFEKTUA

Berotegi efektua zer den ulertzeko, ez dugu ordenagailurik behar. Lurraren tenperaturak aldatu gabe jarraituko du, baldin eta berdinak badira eguzkitik heltzen den energia eta duen tenperaturagatik espaziora igortzen duen energia.



1. irudia. Lurraren energiaren oreka. Eguzkitik datorren energia lerro paralelo bidez adierazten da. Lurrak igortzen duen uhin-luzera luzeko energia norabide guztietan dago markatuta.

Izan bedi S_0 eguzkitik izpi paralelo bidez datorren energia segunduko eta metro karratuko (ikus 1. irudia). Horretatik, α zati bat (albedoa deritzoguna) gainazalean, hodeietan eta abarretan islatu eta espaziorantz itzuliko da, Lurreko prozesuetan eragin termikorik sortu gabe. Onartuko dugu Lurra R_L erradioko esfera beltza eta uniforme dela. Lurraren gainazalak espaziora igortzen duen energia kalkulatzeko, Stefan-Boltzmannen legea erabiliko dugu. Lege honek $S = \sigma T^4$ ekuazioaren bidez adierazten du gorputz beltz batek norabide eta espektroko uhin-luzera guztietan denbora eta azalera unitateko igortzen duen energiaren fluxua (irradiantzia). Beraz, Lurraren gainazala gorputz beltza dela onartuta, hauxe izango litzateke Lurra osoak jasotako eta igorritako denbora unitateko energien kopuruen berdintza:

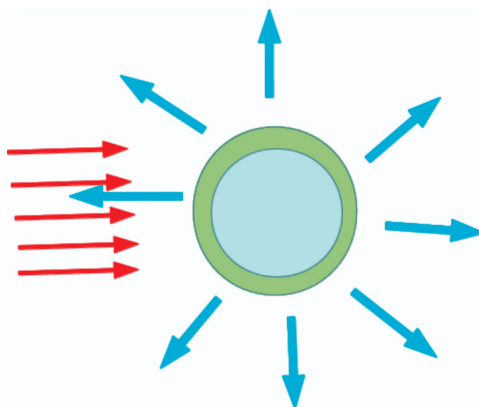
$$S_0 (1 - \alpha) \pi R_L^2 = 4\pi R_L^2 \sigma T^4.$$

Hori kontutan hartuta, errez frogatu daiteke orekako tenperatura hauxe izango litzatekeela:

$$T_{\sigma} = \sqrt[4]{\frac{S_0(1-\alpha)}{4\sigma}}$$

Ekuazio hauek gehiago gara daitezke gaua eta egunaren bitarteko tenperaturen oszilazioa kontutan hartzeko [3], baina hori ez dugu behar une honetan. Gauza garrantzitsu bat esan behar dugu aurreko emaitzari buruz. Albedoko balioa (0.3) eta eguzkitik datorren energiaren irradianzia $S_0 = 1.370 \text{ Wm}^{-2}$ ordezkatzen baditugu aurreko ekuazioan, T_0 lortutako oreka-tenperatura oso txikia da, 255 K (-18°C). Hori ez da benetan gainazaleko batez besteko tenperatura (15°C), eguratseko goiko mailetan agertzen dena baizik. Goiko ekuazioa geure eginda, ontzat ematen dugu honako hipotesi hau: oreka eguzkitik datorren erradiazioaren bidez lortzen da soilik; hori ez da ordea Lurreko gainazalean gertatzen dena.

Goiko adibidean oinarrituta, beste zailtasun bat aurkituko dugu gure azterketa simple honetan



2. irudia. Lurraren inguruan egurats mehea dago.

Planetaren inguruan egurats mehea dago, eta eguratsak gainazaletik datorren uhin-luzera luzeko energia xurgatzen du. Eguzkitik heltzen zaion uhin-luzera laburreko energiarentzat-ordea, guztiz gardena izango da gure egurats bakuna. Lur-gainazalaren energia-fluxuak orekatuta egongo dira Eguzkitik eta eguratsetik heltzen zaizkion energia-fluxuak eta igortzen duen energia-fluxua berdinak badira. Era berean, eguratsaren tenperatura orekatuta egongo da heltzen zaion energia (Lurraren gainazalak igorritako energiaren xurgatutako zatia) eta eguratsak gorantza eta beherantza igorritakoa (bere tenperaturari dagokiona) berdinak direnean. Baldintza hauek jorratuko

ditugu gainazala eta eguratsaren erradioak R_L berdinak badira, eguratsaren lodiera arbuiatuz. Erradiazio monokromatikoaren kasuan, Kirchhoffen legeak eguratsaren xurgapen edo igorpen monokromatikoen arteko berdintza adierazten du, hots: $a_\lambda = \varepsilon_\lambda$. Dena dela, aurrerantzean, ekuazioetan xurgapen a_L edo igorpen ε_L batez besteko balioak erabiliko ditugu kalkuluak errazteko. Beraz, honela geldituko litzateke Lurraren gainazaleko energia-fluxuen oreka adierazten duen ekuazioa, T_e eguratseko oreka-tenperatura eta T_g Lurraren gainazaleko oreka-tenperaturak direlarik:

$$S_0 (1 - \alpha) \pi R_L^2 + \varepsilon_L \sigma T_e^4 4\pi R_L^2 = \sigma T_g^4 4\pi R_L^2.$$

Eguratsa espektro osorako xurgapen koefiziente uniformea duen gorputza izango balitz bezala hartuta, eta goian aipaturiko batez besteko xurgapena eta igorpenak erabiliz, hauxe da eguratsaren energia fluxuen oreka adierazten duen ekuazioa:

$$a_L \sigma T_g^4 4\pi R_L^2 = 2\varepsilon_L \sigma T_e^4 4\pi R_L^2.$$

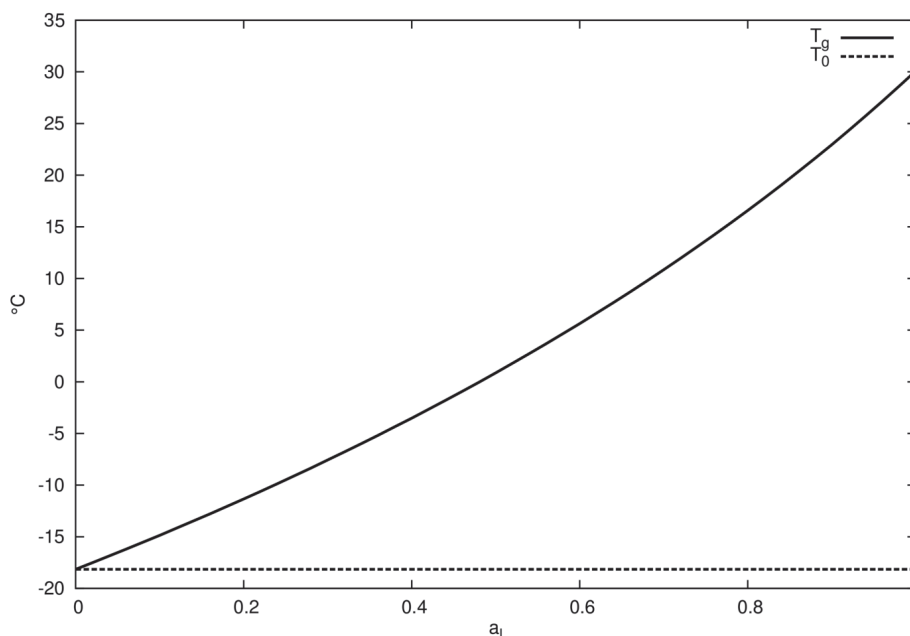
Dena dela, kontutan izan behar dugu Kirchhoffen-en legeagatik $a_\lambda = \varepsilon_\lambda$ direla. Gainera, Lurreko tenperatura eta eguratseko tenperaturen artean alde txikia dagoen legez, $a_L \approx \varepsilon_L$ onartuko dugu. Izan ere, hau ez da guztiz beharrezkoa. Hurbilketa hau onartu ezean, ondoko emaitzean oso antzekoak diren beste konstante biren zatidura geldituko zaigu, beste zailtasunik gabe.

Aipaturiko ekuazioak ebatziz gero, T_g gainazaleko oreka tenperatura honako hau dela frogatu daiteke:

$$T_g = \sqrt[4]{\frac{2}{2 - a_L}} T_0.$$

Bertan, T_0 aurreko kasuko eguratsik gabeko Lurrari dagokion oreka-tenperatura da. Bestetik, a_L Lurretik datorren energia infragorriko batez besteko xurgapen koefizientea da.

Izan ere, aurreko ekuazioan balioak ordezkaturik, eta 3. irudian ikusten dugunez $a_L = 0.2$ denean, gainazaleko tenperatura -11°C izango da, eta $a_L = 0.8$ denean, ordea, gainazaleko tenperatura 16°C -ra heldu da. Tenperaturen igoera hau negutegi efektu naturalagatik agertzen da eta honi esker bizi gaitzke gure planetan: eguratsik gabe klima hotzegia izango litzateke planetan, eta ez genuke bertan bizitzeko izango. Argi dago kalkulu hauek sinpleegiak direla, baina ikusi dugu ondorioa interesgarria dela. Eguratseko uhin-luzera luzeko energia xurgatzen duten gas xurgatzaileen kontzentrazioek gorantza egiten badute, gainazaleko tenperaturak ere gorantza egingo du, nahiz eta planetara energiaren fluxu berdina heldu. Gainazalak igortzen duen energia xurgatzen du eguratsak, eta berriro igortzen du, zati



3. irudia. Eguratsik gabeko Lurrari dagokion T_0 temperatura (lerro ebakia) eta eguratsak sortutako berotegi efektuagatik agertzen den gainazaleko T_g temperatura (lerro jarraitua), a_L energia infragorriaren xurgapen koefizientearen funtzio moduan.

bat espaziorantz eta beste zati bat gainazalerantz; ondorioz, gainazaleko temperatura igo egiten da, 3. irudian ikusten denez.

Ez dugu aldarrikatu nahi adibide bakun hauek benetako tresnak direnik karbono dioxidoaren kontzentrazioaren igoerak ekarriko duen gainazaleko temperaturaren beroketa aztertzeko. Hala ere, adibidea izanik, erraz ulertzen da zelan sortzen den berotegi efektua eta zelan aldatzen den gainazaleko temperatura eguratsaren xurgapenagatik. Garbi dago kalkulu hauek zorrotz egiteko, tresna eta teoria konplexuagoak behar ditugula, baina teoria konplexuek ere, jokamolde berdina erakusten dute [4,5].

Berotegi efektu naturala areagotzeko ahalmena duten gas batzuk daude gure eguratsean. Besteak beste, karbono dioxidoa (CO_2), metanoa (CH_4), oxido nitrosoa (N_2O), eta CFC-ak. Berotegi efektua areagotzeko ahalmena duten gas guztiek temperaturaren igoeran eragiten dituzten aldaketak ez dira berdinak. Gas hauek molekulaka ez dute berdin xurgatzen uhin-luzera berdinetan, gasen kontzentrazioak oso desberdinak direlako eta gas guztien eguratseko biziraupenak ere oso desberdinak direlako. Ur-lurruna da indartsuena, baina oso gutxitan hitz egiten da horretaz, eta arrazoi on batengatik:

bere biziiraupena oso txikia da, 10 egunekoa inguru. Honek esan nahi du batez bestean, isurpenak handitu edo txikitu arren, eguratseko ur-lurrunaren kontzentrazioa orekatu egingo dela euria edo lurrunketaren bidez. Ur-lurrunaren kontzentrazioak tenperaturarekiko duen menpekotasunagatik (Clausius-Clapeyron ekuazioa), epe luzeko tenperaturaren aldaketak sortzeko gaitasunik ez du ur-lurrunaren kontzentrazioaren aldiuneko aldaketa batek, eguratsaren ur-lurrunaren kontzentrazioa berehala orekatzen baitu. Hori esanda, ur-lurrunaren eragina oso garrantzitsua da beste arrazoi batengatik: Beste edozein gasen kontzentrazioaren igoerak epe ertainean tenperatura igoarazten badu, tenperaturaren igoerak handitu egingo du eguratsean dagoen ur-lurrunaren edukiera eta honek areagotu egingo du hasierako aldaketa (beste gasak sortutako tenperaturaren igoera); honelako portaerari berrelikadura-zikloa deituko diogu.

Aurreko parrafoan adigai bi aipatu ditugu, bata biziiraupena eta bestea berrelikadura-zikloa. Biziiraupenak adierazten du batez beste zenbat denbora irauten duen molekula batek Lurreko eguratsean. Eguratsa sistema orekatutzat hartuta, biziiraupena honela kalkulaten da: guztira eguratsean gasaren masa osoa zati sarrerako (edo irteerako) masa-emaria. Biziiraupenak oso desberdinak dira: Metanoaren kasuan 12 urte eta karbono dioxidoaren kasuan ehun urtetik gorakoa. Berrelikadura-zikloaren kasuan onartzen dugu hasierako aldaketa batek erantzuna sortzen duela eta erantzunak sor dezakeela hasierako aldaketaren aldeko erantzuna (barne berrelikadura ziklo positiboa) edo hasierako aldaketaren kontrakoa (barne berrelikadurako ziklo negatiboa). Klimaren kasuan, berrelikadurako ziklo (aurreko kasuetan «barne berrelikadurako zikloa» jarri dugu) hauek asko daude. Tenperatura igotzen bada, lurrunketa areagotuko da, honek uhin-luzera luzeko irradiazioaren xurgapen handiagoa sortuko du eta azken batean, tenperatura altuagoa sortu eta barne elikadurako ziklo positiboa eragingo da. Hona hemen beste ziklo negatibo bat: tenperatura igotzen bada, energia gehiago igorriko du Lurrak espaziora, eta horrela izanda, tenperatura jaitsi eta barne berrelikadurako ziklo negatiboa eragingo da. Beste ziklo garrantzitsu bat tenperatura-albedokoa da. Tenperaturak gora egiten duenean, izotz geruzako azalera txikitu egingo da; albedoa (hau da, eguzkitiko energiaren frakzio islatua), txikitu egingo da eta ondorioz, tenperaturak gora egin eta barne elikadurako ziklo positiboa itxiko da.

Barne elikadurako ziklo batzuk badaudenez, oso zaila da aldaerazpenen ondorioak modu erraz batean kalkulatzeko. Orokorrean klima-sistemako azpisistemen arteko harremanak kontutan hartu behar izateak badakar edozein ondorioak kontserbazio-lege batzuen arabera gertatzea. Hots, klima-oreka «berrian», eguzkitik datorren energiak eta espaziorantz Lurrak igorritakoak berdinak izan behar dute. Eguratsaren momentu angeluarrak kontserbazio-legea bete beharko du, ozeanoa eta eguratsaren arteko ener-

giaren elkartrukeek ere egoera berrira egokitu beharko dute, eta abar. Beraz, ez dago tresna sinplerik kalkulu horiek guztiak batera eramateko, eta horregatik erabiltzen dira klima ereduak.

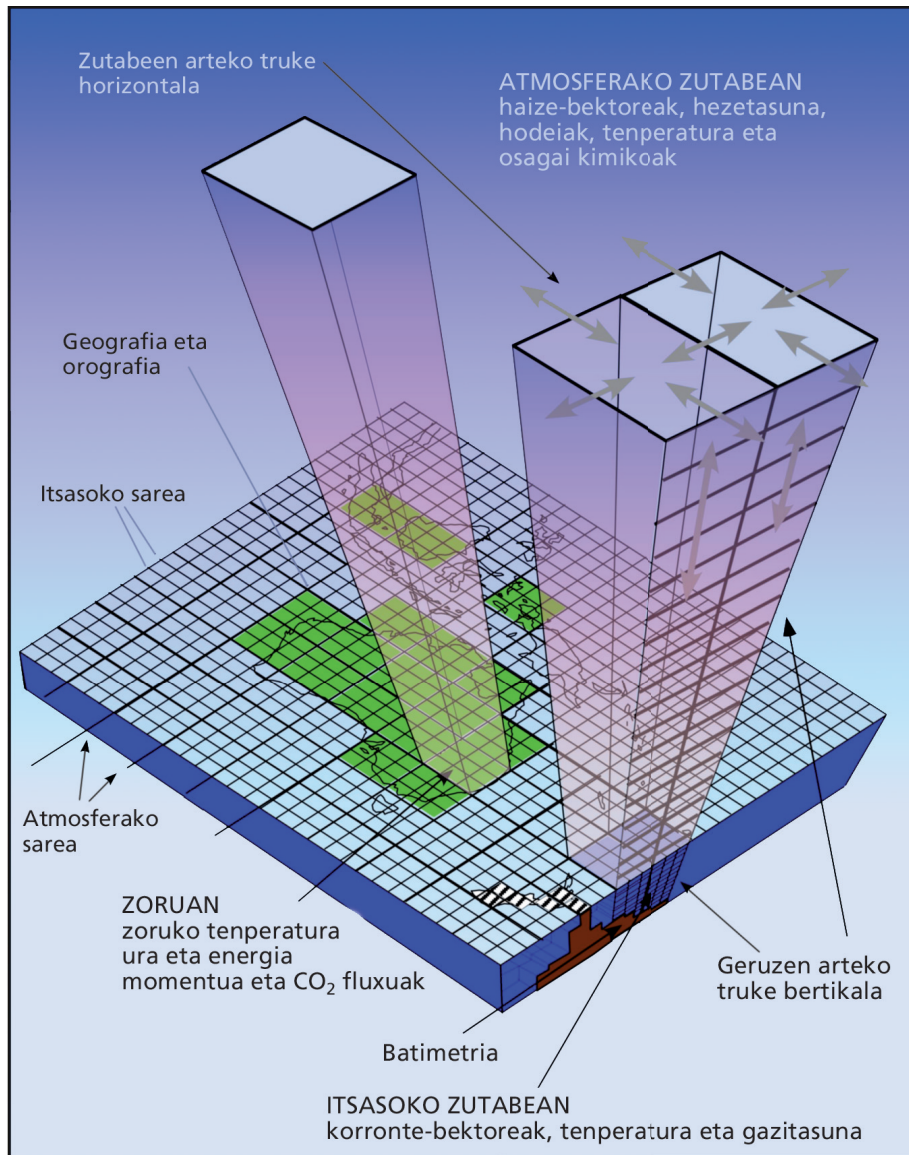
KLIMA EREDUAK

Klima-sisteman gizakiak eragindako? aldaerazpenak etorkizunean sor lezaketen inpaktua aurreikusteko, beharrezkoa da Lurreko klima-sistemako funtsezko prozesu fisiko, kimiko, biologiko eta berrelikadura-ziklo guztien eraginak kalkulatzeko. Prozesu hauek adierazpen matematikoen bidez irudika ditzakegu, baina sistemaren konplexutasunak behartzen gaitu kalkuluak ordenagailuen bidez egitera. Formulazio matematikoa eredu izeneko ordenagailu-programan implementatzen da. Klima simulatzeko ahalmena duten ereduetan programatuta daude zenbait klima-sistemaren osagai, hala nola eguratsa, ozeanoa, kriosfera, eta lurra. Berez, antzekotasun handia dago egungo klima ereduaren eta eguraldiaren iragarpenean erabiltzen diren ereduaren artean. Bestetik, berezitasun batzuk ere badaude, esaterako, eguraldiaren iragarpenean erabiltzen diren zenbakizko ereduak ez dute zertan % 100ean energia kontserbatu, haien integrazioa epe laburrean egiten da eta. Klima ereduak, ostera, energia kontserbatu behar dute, haien emaitzak sinesgarriak izateko. Azpimarratu beharra dago klima ereduak klima ereduak fisikaren oinarritzko printzipioetan oinarrituta daudela eta ez direla denbora segidetan erabiltzen diren teknika estatistikoen bidezko kalkuluak. Ez dago doiketa prozesurik eta energia, masa edo momentuen funtsezko kontserbazio-legeetan oinarritzen dira. Gaur egun badago eskuragarri eredu klimatikoen multzo handi bat. Horietatik egin nahi den simulazioaren arabera, aukeratzeko da mota bat edo beste. Klima ereduaren garapena gauzatu da faktore-kopuruaren eraginpean. Klima eredu sinpleak asko garatu dira klima eredu konplexuen ezaugarri nagusiak isolatzeko, luzeagoak diren simulazioak eraman ahal izateko edo klima-osagaien kopuru handiago bategatik azpimultzo txikia hartzeko.

Klima eredurik sinpleenak zero edo dimentsio bakarreko Energia Orekako Klima Ereduak dira (EBMak). Haietan zoruko tenperaturaren aldaketa iragartzen da latitudearen funtzioan. Dimentsio bateko Klima Eredu Erradiatibo Konbektiboak eta Zutabe Bakarreko Klima Ereduak bertikalean gertatzen diren prozesuak aztertzen dituzte. Badira bi dimentsioko Klima Eredu Estatistiko Dinamikoak, eta, haietan, dimentsio meridionala eta altuera hartzen dira kontuan.

Gaur egun, Zirkulazio Orokorraren Klima Ereduak edo Mundu Osoko Klima eredu (GCM-ak) dira zientzialariek klima ebaluatzeko eskuragarri dituzten tresnarik garatuak. Mundu osoko Ereduak simulazio luzeak egiteko denbora luzeegia behar dute, konplexuegiak direlako. Beraz, Lurraren

Konplexutasun Ertaineko Klima Ereduak (EMIC-ak) sortu dituzte, tarte lu-
zeak simulatzeko. Hauetan Fisika, Geokimika eta Biologiaren legeak inple-
mentatzen dituzte oso era bakun batean. EMIC-ak eraginkor samarrak dira
ordenagailuetan epe luzeko klima-simulazioak gauzatzeko (hamar milaka
urteko epeak).



4. irudia. Oinarrizko ezaugarriak eta prozesuak GCM batean, eguratsa eta itsa-
soa zutabeetan zatitzen dira. Zutabeak Lur osoan zehar zabaltzen dira [6].

Eguratsaren eta itsasoaren hiru dimentsioko izaera 4. irudian ikusten den bezala agertzen da GCM batean. Klima-zientzialariek hiru dimentsioko sare batean zatitzen dituzte klima sistemako osagaiak. Sare horretako zelulen arteko elkar trukeak ebaluatzen dituzte eta modu horretan ebazten dira sistemako funtsezko ekuazio diferentzialak, grid izeneko sare-zelula bakoitzean emaitzak ebaluatuz. Klima ereduak sare-zelula bakoitzean kalkulatzen ditu haizeak, energiaren-transferentziak, hezetasun erlatiboa, zoruko hidrologia eta antzeko aldagaiak, eta ondoko sare-zeluleekiko elkarrekin-tzak ebaluatzen ditu.

Dena dela, egungo klima ereduetan eskala horizontala (sare-zelulen neurria) nahikoa zabala da (100 km ingurukoa), eta sare-zelula batean eskala txikiagoetan gertatzen dira hainbat prozesu. Euri tantak askoz txikiagoak dira, eta hodei konbektiboak ere ez dira sare-zelula bezain handiak. Beraz, prozesu batzuk ezin dira oinarrizko lege fisikoen bidez identifikatu sare-zelulako eskala horizontalean eta erlazio estatistikoak erabili behar dira halako eskala txikiko efektuak sare-zelulako aldagaien funtzio moduan adierazteko. Hauei parametrizazioak deitzen zaie [7]. GCM-ek zenbakizko parametrizazio eskema desberdinak erabiltzen dituzte: konbektioa, mugaguzan zeharreko transferentziak, transferentzia erradiatiboa, lurrunketa eta euriaren sorreran edo zoru-azaleraren prozesuen irudikapen erraztuak besteak beste. Parametrizazio hauen bidez ereduaren sare-bereizmenaren azpian dauden prozesuen eraginak klima ereduaren sartzen dira. Klima eredu desberdinetako parametrizazioen formulazioa egitean, zehaztugabetasunak agertuko dira, osoa ez den errealitate-irudikapenaren ondorioz. Klima eredu desberdinek zenbakizko parametrizazio eskema desberdinak erabiltzen dituzte prozesu fisiko berdinak matematikoki irudikatzeko. Hau delata, aurreikusitako denborak aurrera egin ahala, klima eredu desberdinek emaitza desberdinak adieraziko dituzte hasierako baldintza berdinetatik hasita ere.

Klima-sistemari dagozkion oinarrizko ekuazioak linealak ez direla kon-tuan hartuta, emaitza sistemaren oso sentikorra da hasierako baldintzekiko. Denborak aurrera egin ahala, bi emaitza elkarrengandik nabarmenki banan-duko dira horrelako sistemaren bi simulazio bi baldintza ia berdinetatik ha-siz gero. Hasierako baldintzetako ziurgabetasunengatik egindako akatsen hazkundera hasierako baldintzen menpekota da. Beraz, auresankortasun de-terminista mugatua da eta iragarpen determinista alferrikakoa da aurreikus-penari dagokion tartea muga batetik aurrera egin ondoren. Ideia hau azal-tzeko asmotan, Lorenzek tximeleta efektua izeneko teoria gauzatu zuen eredu matematikoaren bidez kaosa ulertzeko. Lorenzek eguratsaren higidu-ra-ekuazio erraztuetatik hasita garatu zuen teoria hau [8]. Eguraldi-iraga-rritasunaren mugak iragarpen-multzoak (*ensembles*) erabiltzera behartzen gaitu. Teknika hau iragarpen-eredu bat zenbait aldiz erabiltzean datza. At-mosfera eta ozeanoaren egoera ez da erabateko zehaztasunez ezagutzen eta

haien ziurgabetasunekin bat datozen hasierako baldintza desberdinetatik hasita gauzatzen dira ereduak.

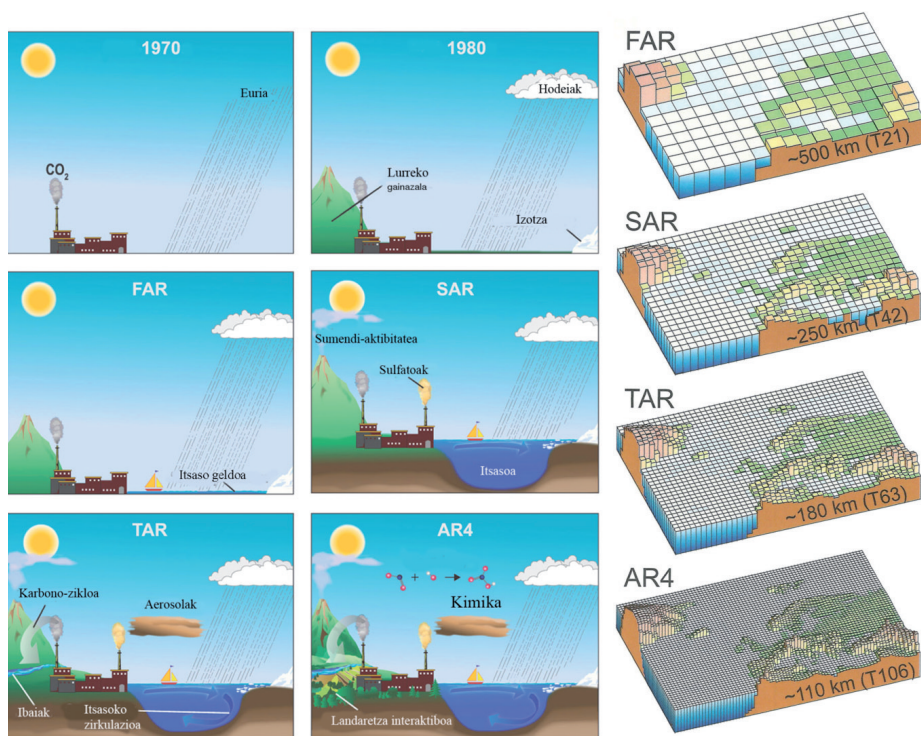
GCM-en bidezko saiakuntzek etorkizun handiko hurbilpen ona eskaintzen dute, etorkizuneko eta iraganeko klimak azaltzen dituzten mekanismo fisikoak hobeto ezagutzeko. GCM-ak tresna akastunak dira, eta GCM-en garapena hobetzeko, funtsezkoa da behaketak egitea eta behaketa hauek klima ereduak sortutako iragarpenekin erkatzea. Hala ere, erkaketa honetan kontuan izan behar dugu klima ereduaren simulazioak iragarpen deterministak duen tarte maximoetik aurrerago egiten direla. Beraz, erkaketak egiterakoan ezin da koerlazio koefizientea edo horren moduko tresnarik erabili, klima ereduak ez baitituzte simulatzen klima sistemaren fase-espazioan zeharreko benetako ibilbideak. Ebaluazioak egiterakoan, kontuan hartu behar ditugu aldagaien balio estatistikoak, batez besteko balioak, aldakortasuna (bariantza edo muturreko perzentilak) eta abar. Ez da zuzena pentsatzea maiztasun handiko aldaerazpenak denboran parekatuta egon behar dutela ereduaren emaitzetan eta behaketetan. Batez bestearen joerak bezalako maiztasun txikiko balioetan ordea, pentsa daiteke balio horiek lotura izan behar dutela negutegi efektua indartzeko ahalmena daukaten gasen kontzentrazioen igoerarekin. Hala ere, egungo klima ondo simulatzen duen klima eredu batek ez du zertan egin etorkizuneko klimaren aurreikuspen fidagarriarik Nahiz eta muga eta zailtasun hauek egon, gaurko klimaren behaketekin ereduaren arteko adostasuna da daukagun modu bakarra klima ereduakiko konfidantza lortzeko. Eredu batek gaurko klima zehazki deskribatuz gero, pentsatzekoa da proiektzio hobeak egingo dituela etorkizunean. Ondorioz, gaur egun zientzialari talde asko lanean ari da klima ereduaren ebaluazioan edo balioztatzean.

KLIMA EREDUEN GARAPENA

GCM-ak eraikitzerakoan, eguratsetik hasita, osagarri eta elkarrekintza guztiak urratsez urrats sartu dituzte, eguratsaren ostean ozeanoaren datuak sartzen. Horrela, kontuan hartu da egungo klima ereduaren ozeanoaren eta atmosferaren hiru dimentsioko izaera. Guztiz akoplatutako klima ereduak, prozesu gehiago simulatzen saiatzen dira eta ozeanoaren eta atmosferaren hiru dimentsioko denboraren bilakaeraren irudikapen bat sortzen dute. Gehienetan, bereizmen bertikala horizontala baino meheagoa da eta, geruza kopurua zutabe kopurua baino txikiagoa da. Klima eredu akoplatu hauek dira diseinatutako tresnarik sofistikatuenak, Lurreko klima-sistema eta bere osagarrien arteko elkarrekintza konplexu guztiak simulatzeko.

Klima Aldaketari buruzko Gobernuarteko Taldeak, IPCC-ak *Assessment Report, AR* izeneko 4 txosten argitaratu ditu dagoeneko: *First As-*

essment Report (FAR, 1990), Second Assessment Report (SAR, 1995), Third Assessment Report (TAR, 2001) eta Fourth Assessment Report (AR4, 2007). Denborak aurrera egin ahala, osagarri eta prozesu gehiago gehitu eta osagarrien arteko akoplamendua eta espazioko bereizmena hobetu dira (5. irudia).



5. irudia. IPCC-ko txostenetan urteetan zehar erabilitako ereduaren garapena (ezkerrean) eta ohiko bereizmen horizontala (eskuma) [9].

Egun, nazioarteko hamabi meteorologia-gune baino gehiagok klima eredu akoplatuak garatu dituzte, klimaren eta klima-aldaketaren ulermenean sakontzeko eta IPCC-ari bere jardueretan laguntzeko. Guztiz akoplatuak diren zenbait klima eredu IPCC-ren laugarren ebaluazio-txostenean (AR4) sartu dira. Klima eredu akoplatu hauei IPCC AR4 klima ereduak deitzen zaie (ikusi 1.taula).

1. taula. IPCC-ko AR4 klima eredu akoplatuak. IPCC ereduaren izena, atmosferaren bereizmen erresoluzio horizontala, maila bertikalen kopurua eta jatorrizko herrialdea.

AR4 Eredua	Bereizmena (eguratsa)	Herrialdea
BCCR-BCM2.0	T63 L31	Norvegia
CCCMA-CGCM3.1 (T47)	T47 L31	Kanada
CCCMA-CGCM3.1 (T63)	T63 L31	Kanada
CNRM-CM3	T63 L45	Frantzia
CSIRO-MK3.0	T63 L18	Australia
CSIRO-MK3.5	T63 L18	Australia
GFDL-CM2.0	2.5° × 2.0° L24	Amerikako Estatu Batuak
GFDL-CM2.1	2.5° × 2.0° L24	Amerikako Estatu Batuak
GISS-AOM	4° × 3° L12	Amerikako Estatu Batuak
GISS-EH	5° × 4° L15	Amerikako Estatu Batuak
GISS-ER	5° × 4° L15	Amerikako Estatu Batuak
IAP-FGOALS1.0	T42 L26	Txina
INGV-ECHAM4	T106 L19	Italia
INM-CM3.0	5° × 4° L21	Errusia
IPSL-CM4	2.5° × 3.75° L19	Frantzia
MIROC3.2-HIRES	T106 L56	Japonia
MIROC3.2-MEDRES	T42 L20	Japonia
MIUB-ECHO-G	T30 L19	Alemania
MPI-ECHAM5	T63 L31	Alemania
MRI-CGCM2.3	T42 L30	Japonia
NCAR-CCSM3.0	T85 L26	Amerikako Estatu Batuak
NCAR-PCM1	T42 L26	Amerikako Estatu Batuak
UKMO-HADCM3	3.75° × 2.5° L19	Erresuma Batua
UKMO-HADGEM1	1.875° × 1.25° L38	Erresuma Batua

ISURIEN AGERTOKIAK ETA PROIEKZIOAK

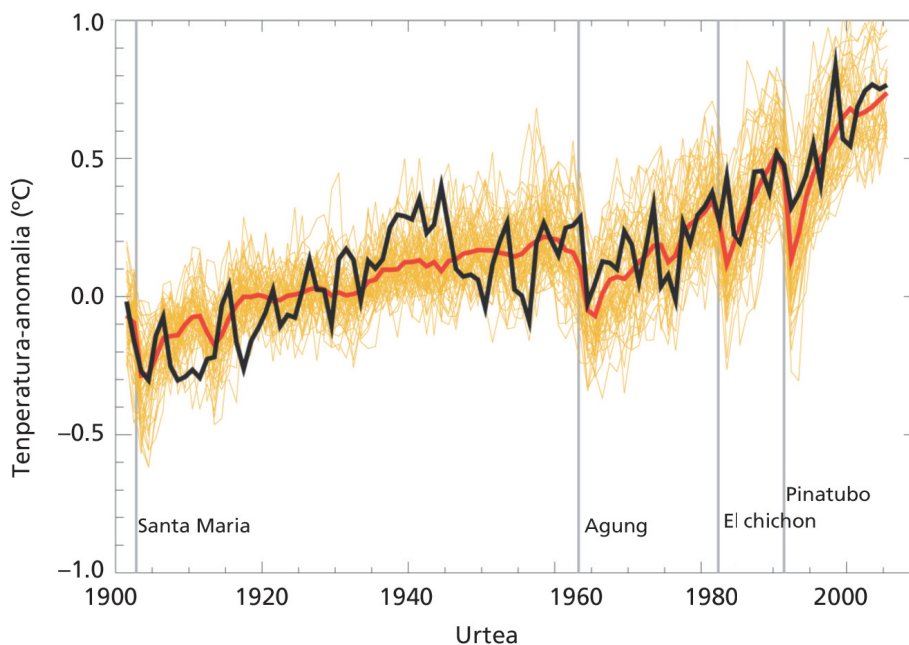
Klima-zientzian, atmosferako geruza desberdinen arteko irradiazio-elkartruke netoko aldaketa indartze erradiatibo izenaz ezagutzen dugu eta tropopausako¹ metro karratuko watt-etan adierazten da. Adigai hau esanahi tekniko espezifiko batekin erabili da IPCC-ren ebaluazio-txostenetan; ale-

¹ Tropopausa estratosfera eta troposferaren arteko eguratseko geruza da. Troposfera Lurrarekin kontaktuan dago, estratosfera horren gainean. Troposferako beheko gunetan energia-fluxuak konbektiboak dira, eta troposferako goiko gainazalitik gorantz (edo behe-rantz), energia-fluxuak erradiatiboak dira. Horregatik aukeratzen da altuera hori indartze erradiatiboa definitzeko.

gia, Lurraren klima-sistemaren energia-oreka erradiatiboan kanpotik ezarritako eragindako aldaerazpena adierazteko erabiltzen da. Aldaerazpen honek aldaketak eragin ditzake klima-aldagaietan. Kanpoko aldaerazpenak naturalak edo antropogenikoak izan daitezke: naturalen artean baditugu eguzki-irradiazioen aldaketak edo sumendien isuriak, besteak beste; antropogenikoen artean baditugu giza jarduerak sortutakoak, eta batez ere berotegi-gasen isurketen ondorioz sortutakoak.

IPCC AR4 klima eredu simulazioetan XX. mendean zehar beharuriko kanpoko eragile benetakoen multzoa edo etorkizuneko balizko eragileen multzoak erabiltzen dira, beti ere naturalen edo antropogenikoen artean. Eragile hauen formulazio zehatza eredu eta saiakuntzaz saiakuntza aldatzen da. Interesgarria izan liteke jakitea zein izan den azken hamarkadetan zehar eguzkiaren irradiazioaren aldaketek ekarri dituzten tenperaturaren aldaketa. Ereduen bidezko esperimenduak diseinatzen direnean hainbat eragile egon daitezke eta haien azpimultzo bat erabiltzen da, ikertzailearen interesaren arabera. Bestetik, beste interesa izan daiteke jakitea: zein klima espero ote dezakegu gaur egungo energiaren kontsumoa ez badugu murrizten?. Galdera konkretu eta zehatz hauen aurrean, hipotesi desberdinak gauzatu behar dira klima eredu erabilpenen. 20C3M saiakuntzaren kasuan esaterako, simulazio bakoitza industria aurreko garaietako beste kontrol-simulazioaren baldintzetatik abiatu dira. Hau da, 500 urtez karbono dioxidoaren kontzentrazioa konstante mantentzen da, 275 ppm-ean. Ondoren, 1860-2000 tartean zehar neurturiko berotegi-gasen edo aerosolen kontzentrazioak eta eguzkitik datorriko energiaren kopuru aldakorrak erabiltzen dira aldagai eragile bezala. Hau da, CO₂-ren kontzentrazioak 286 ppm-tik 367 ppm-ra aldatzen da eta joan den mendean beharuriko irradianzia ere erabiltzen da. 6. irudian ikus daiteke behaketen eta 20C3M simulazio hauen arabera mundu mailan batez beste zoruan egon den tenperatura, azken mendean zehar. Tenperatura bien bilakaerak oso antzekoak dira, eta behatutako bilakaera ezin da eredu bidez lortu, gizakien eraginak kontuan hartu ezean. Eragile naturalak soilik erabiliz gero, eredu ezin dute simulatu mundu mailan behatutako tenperatura.

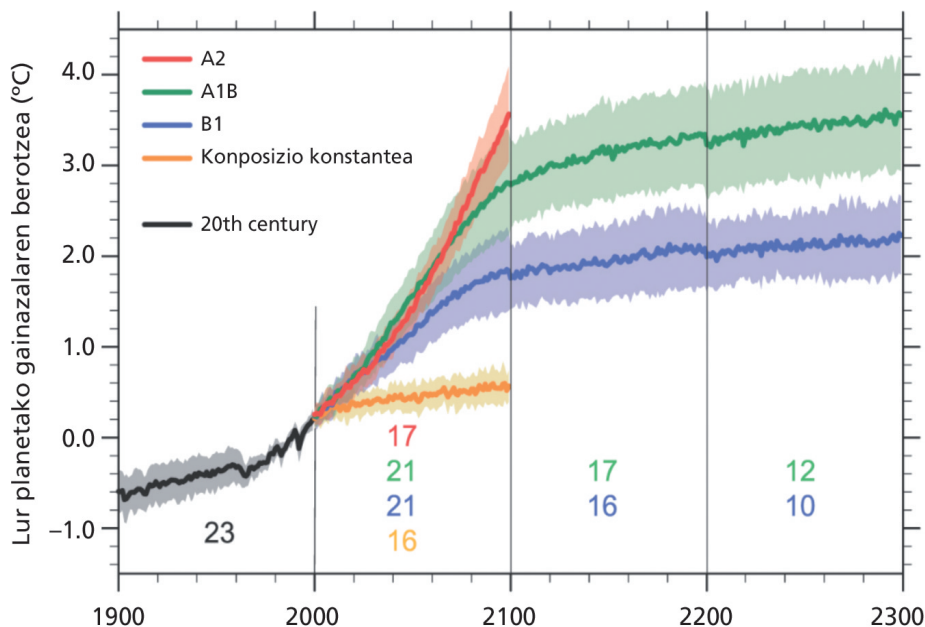
Zientzialariek klima eredu desberdinen bidez XXI. mendeko klima-sistemaren aldaketak kalkulatu dituzte isurien agertokietan oinarrituta. Isurien-agertoki batek etorkizunean berotegi-gasen (CO₂, CH₄, NO_x, CFCak) eta aerosolen kontzentrazioak adierazten ditu isurien-aldaketen zenbait usteren arabera. Ez ditugu ezagutzen munduko etorkizuneko politikan, gizar-tean, teknologian eta ekonomian egongo diren garapenak, eta beraz, zenbait aukera egin behar dira. Beraz, isurien agertokiek muturreko mugak adierazten dizkigute, nolabait esatearren, eta horren arabera kalkulatu dira energiaren kontsumo maximoak edo minimoak, isurien maximoak edo minimoak eta, espero daitezkeen aldaketa maximoak edo minimoak.



6. irudia. Mundu osoan behatutako batez besteko temperaturaren anomalia (lerro beltza) eta 20C3M saiakuntzaren bidez eredu askok simulaturiko temperaturak (lerro laranja meheak). Lerro gorriak adierazten du eredu guztien araberrako baliorik litekeena [9].

2100 urtera arteko eperako deskribatu dituzte IPCC-ren A2, A1B eta B1 isurien agertokietan, biztanlerian, energia-iturrien erabileran eta energia-teknologietan espero daitezkeen aldaketak. Agertoki bakoitzak, gerta litekeen etorkizun banaren garapena deskribatzen du. Isurien agertoki hauei XXI. mendeko bukaerarako berotegi-gasen kontzentrazio handia, bitarteko kontzentrazioa eta kontzentrazio txikia egokitu zaizkie, eta industria aurreko garaietako simulazioen luzapen moduan sortzen dira agertokiaren arabera; hots, etorkizuneko isuriak aldatzen dira, eta iraganen behatutako kontzentrazioak berriz, ez (ikusi 7.irudia).

IPCC-ren proiektzio hauek muga-baldintzen aldaketaren araberrako emaitzak adierazten dituzte. Etorkizuneko klima horrelakoa izango da baldin eta muga-baldintza horiek benetan gertatzen baldin badira, baina hori ezin dugu zehaztasunez aurreikusi. Iragarpenen baliogarritasuna definituriko kanpo eraginek ezartzen dute. IPCC-ren AR4 ebaluazio-txostenak (2007) klima-proiektzioei buruzko informazioa laburbiltzen zuen. Ebaluazio-txostena A2, A1B, B1 faktore eragileetan eta beste isurien agertokietan oinarrituta zegoen.



7. irudia. A1B, A2, B1, 20C3M eta CO₂-ko kontzentrazio konstanteko agertokiaren arabera ereduak aurreikusten duten munduko batez besteko tenperatura. Gai-nazaleko berotze globala.

7.irudian ikusten denez, IPCC-ko AR4 txostenean parte hartu zuten klima eredu guztiek proiektatzen dute zoruko airearen mundu mailako tenperatura handiagotzeko joera duela agertoki guztietan. AR4-ko zoruko berotzearen eredu globalen batez besteko proiektzioak 1980-1999 tartearikiko aldaketa bezala ikusten dira A2, A1B eta B1 eskenatokitik, xx. mendeko simulazioen luzapenak izanik.

Berotegi-gas eta aerosol guztien kontzentrazioak 2000. urteko mailetan konstante geldituta ere, 0.1°C/hamarkada inguruko berotzea proiektatzen da, klima-sistema berriro orekatu arte. Irudiak argi adierazten du beste gauza garrantzitsu bat: Ereduen arteko desberdintasun matematikoak txikiagoak dira agertokiak ezartzen duten desberdintasunak baino. Hau da, B1 lerroko inguruko eredu bakan guztiek definituriko zehazgabetasun tartea (lerro jarraien inguruko guneko koloreztatua), askoz txikiagoa da A2 eta B1 agertokiaren arteko distantzia baino. Hau da, fisikoki edo matematikoki ereduaren artean suma daitezkeen desberdintasunek (ekuazio diferentzialak ebazteko erabiltzen diren teknika diskretuak edo prozesu fisikoen parametrizazioak) ez digute uzten iragarpenaren erabateko zehaztasuna bermatzen. Hala ere, gizartearen etorkizuneko portaerarekin loturiko zehazgabetasuna

(A2 eta B1 agertokien arteko tartea alegia) askoz zabalagoa da. Etorkizuneko klima beroagoan, egungo GCM-ek adierazten digute euria handiagotu egingo dela tropikoko eskualdeetan eta goi latitudeetan. Euriaren murrizketa orokorki tropiko azpiko eskualdeetan espero da. IPCC AR4 klima ereduak oro har ur-lurrunaren kontzentrazioa, lurrunketa eta euri kopuru osoa handiagotzea ere proiektatzen dute.

KLIMA ALDAKETA EUSKAL HERRIAN

Edozein modutan, goian aipaturiko emaitzak mundu osoari dagozkio, eta gunee txikiak jota, ziurgabetasunak zabalagoak dira. Zenbakizko ereduaren portaera ez da berdina toki guztietan eta haiek ezin dituzte behar bezala irudikatu gunee txikiak eragileak diren beste faktore batzuen aldakortasuna. Topografia esaterako, oso garrantzitsua da gunee txiki bateko euriaren portaera ebaluatzeko. Dena dela, ereduaren zelula sarea 200 km ingurukoa izanik, zenbait tokitan pentsa daiteke topografiaren jokamoldea ez dagoela ondo irudikatuta mundu mailako ereduaren simulazioetan, bereziki topografia eskala txikiagoetan aldatzen bada. Horretarako beraz, beste teknika berezi batzuk erabiltzen dira eskala handiko ereduaren emaitzak gunee txikiak eramateko. Horretarako, mota biko teknikak erabiltzen dira. Batean, harreman estatistiko sendoak aurkitzen dira eskala handiko zenbakizko ereduaren iragarpenen eta tokian tokiko behaketen artean. Onartzen bada harreman horiek berdin eragingo diotela etorkizuneko klimari, pentsatzekoa da horien bidez eskala handiko ereduaren emaitzetatik abiatuta, gunee horretako tokiko etorkizuneko klima iragartzea posiblea izango dela, eskala txikiak eraginak kontutan hartuz harreman estatistiko horren bidez. Honi, eskala-jaitsiera (downscaling) estatistikoa deritzogu [10].

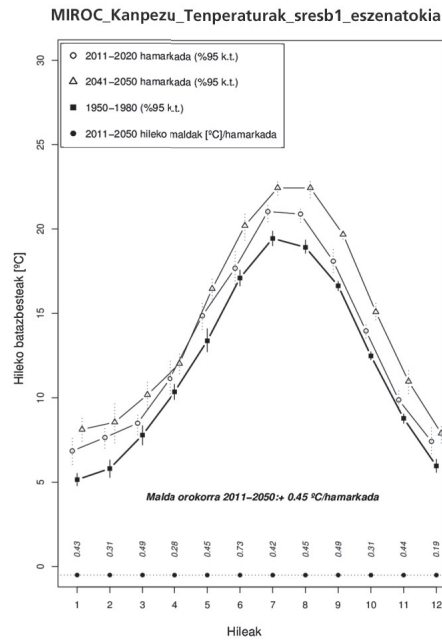
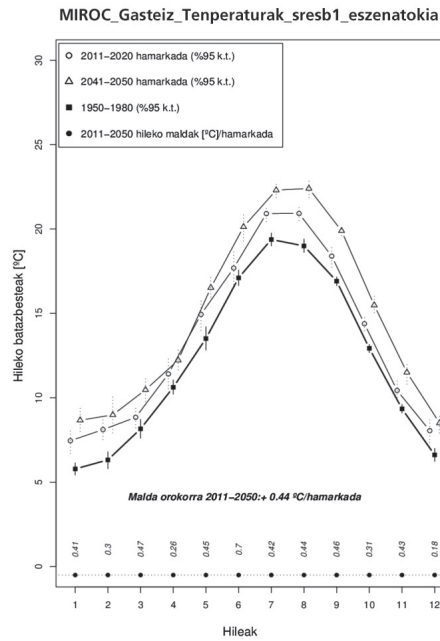
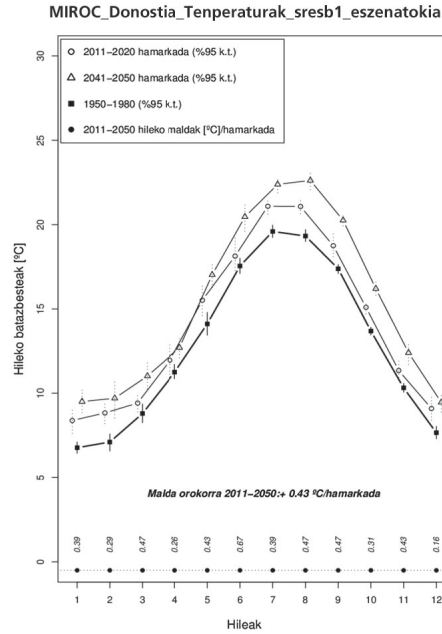
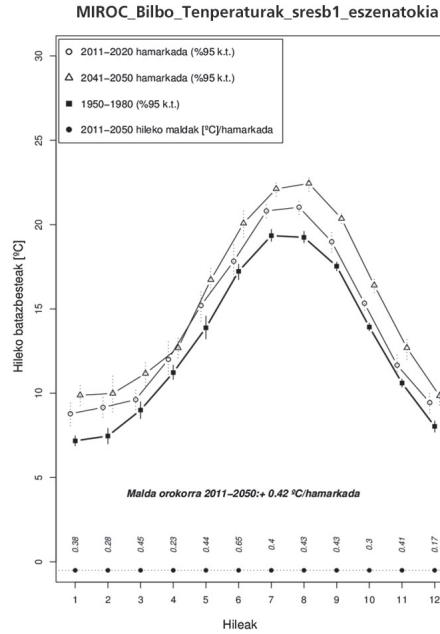
Beste bide bat izan daiteke sare txikiak zenbakizko eredu bat erabiltzea, mundu mailako sare zabaleko ereduak emandako emaitzen barruan (eskala-jaitsiera dinamiko).

Lan honetarako gure gunean ondo ebaluatuta dauzkagun AR4-ko mundu mailako eredu bi (HADCEM edo HadCM3 eta MIROC-HIRES) eta bereizmen handiko bi guneko ereduak (UCLM-PROMES eta ETHZ) aukeratu ditugu. Euskal Herriko hiru klima gunetan aztertu ditugu eredu horien etorkizunerako emaitzak, Hegoaldeko hiru hiriburuetan eta Kanpezun, hegoaldeko leku lehorrenetako bat. Klima eredu horiek toki horietarako ematen dituzten aurreikuspenak hartu ditugu 2010-2050 tartean. Muturreko bi isurien agertokiei dagozkien irteerak erabili ditugu: B1 (isuri txikiak) eta A1B (isuri handiagoko agertokia) alegia. Gunee bakoitzeko irteeretan joerak kalkulatu ditugu eta joera horien esankortasun estatistikoa aztertu dugu, Monte Carlo metodo baten bidez. Emaitzak 2. taulan ikus daitezke. Edo-

2. taula. Euskal Herrian itxaron daitezkeen aldaketak, GCM klima ereduen edo bereizmen handiko ereduen arabera, eta A1B eta B1 agertokiaren arabera, kostaldeko eta barruko aldeko zenbait lekutan kalkulaturik.

Tokia	Agertokia	Temperaturaren joera (°C/hamarkada)	Prezipitazioaren joera (mm/egun)/ hamarkada)
Bilbo	A1B	0,47	
Bilbo	B1	0,21	-0,04
Donostia	A1B	0,49	
Donostia	B1	0,22	-0,08
Gasteiz	A1B	0,52	
Gasteiz	B1	0,22	-0,02
Kanpezu	A1B	0,54	
Kanpezu	B1	0,22	-0,02

zein kasutan, tenperaturak gora egingo du (B1 edo A1B agertokietan). Hala ere, isuriak mugatzen baldin badira, igoera txikiagoa izango da. Euriari dagokionez, joerak ez dira tenperaturakoak bezain handiak izango eta, izan ere, B1 agertokiaren kasuan, joerak ez dira zerotik desberdinak, % 95eko konfidantza tartea kontuan hartuz. Euskal Herriaren kasuan, itsasotik hurbil egotea abantailatsua izango da, euriari dagokionez, eta ez da gutxituko beste hainbat lekutan espero den bezala. Taula honetako balioak kalkulatzeko eredu guztien (globalen eta gunekoen) joeren batzuetan besteak beste kalkulatu dugu agertokiko, aldagaiko eta tokiko joera guztiak erabiliz. Bukatzeko, hilean hileko egungo sasoi-zikloak eta etorkizunean itxaron daitezkeen sasoi-zikloak ere aztertu ditugu, eta B1 agertokiaren kasuan, tenperaturarako emaitzak 8. irudian daude, MIROC ereduaren emaitzetatik hartuta. Ikusten denez, hileko segida guztietan agertzen dira estatistikoki esanguratsuak diren joerak, baina sendagoak izango dira udako hilabeteetan. Berotze sendagoa espero daiteke barruko aldean kanpoko aldean baino. Antzeko emaitzak ikusten dira A1B agertokiari dagozkion datuetan. Artikulu honetan emaitza hauek besterik ez dugu erakutsiko, baina taldeko WEB orrian emaitza gehiago daude, irakurleak erabiltzeko prest (<http://www.ehu.es/eolo/ekaia-klima>).



8. irudia. Hilean hileko sasoi-zikloa (Bilbon, Donostian, Gasteizen eta Kanpezun), mundu mailako MIROC ereduaren arabera, tarte desberdinetan eta B1 isurien agertokirako. Grafika bakoitzeko beheko partean hile bakoitzeko joerak (2011-2050 tartean) eta joeren esankortasun estatistikoa aurkezten dira.

BIBLIOGRAFIA

- [1] WEART, S.R. (2004). *The Discovery of Global Warming*. Harvard University Press, Cambridge.
- [2] PEIXOTO, J.P. eta OORT, A.H. (1992). *Physics of Climate*. American Institute of Physics, New York.
- [3] SMITH, A.P. (2008). *Proof of the atmospheric greenhouse effect*. arXiv:0802.4324v1
- [4] SALBY, M.L. (1996). *Fundamentals of Atmospheric Physics*. Academic Press, San Diego.
- [5] LIOU, K.N. (2002). *An Introduction to Atmospheric Radiation*, 2. argitalpena. Academic Press, San Diego.
- [6] MCGUFFIE, K. eta HENDERSON-SELLERS, A. (1999). *A Climate Modelling Primer*, 2. argitalpena. John Wiley and Sons Ltd, Chichester.
- [7] STENSRUD, D.J. (2007). *Parameterization Schemes: Keys to Understanding Numerical Weather Prediction Models*, Cambridge University Press, New York.
- [8] LORENZ, E.N. (1963). «Deterministic nonperiodic flow». *Journal of Atmospheric Sciences*. 20:130-141.
- [9] IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [10] BENESTAD R.E.; HANSEN-BAUER, I. eta CHEN, D. (2008). *Empirical-Statistical Downscaling*. World Scientific Publishing Company, Singapore.