



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

ZIENTZIA
ETA TEKNOLOGIA
FAKULTATEA
FACULTAD
DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA



Gradu Amaierako Lana
Fisikako Gradua

Eguratseko energia potentzial eskuragarria

1979-2019

Egilea:
Mikel Sarasua Etxeberria
Zuzendaria:
Jon Saenz Agirre

Gaien Aurkibidea

Sarrera	3
1 Oinarri teorikoa	4
1.1 Atmosferako zirkulazioa	4
1.2 EPE: Energia potentzial eskuragarria	6
1.3 <i>El Niño</i>	11
1.4 Erreanalisi	12
2 Metodologia	13
2.1 Analisi espaziala	14
2.2 Denbora-analisia	17
2.3 <i>El Niño</i>	17
2.4 Tresnak	20
3 Emaitzak	21
3.1 EPEren balio osoak	21
3.2 Analisi espaziala	22
3.3 <i>El Niño</i>	25
3.4 Denbora-analisia	30
4 Arazoak eta hobekuntzak	33
5 Ondorioak	37
Bibliografia	38

Sarrera

Lurraren atmosferako energia mekanikoen azterketa XX. mendearen hasieran hasi zen. 1903an, Margules-ek ekaitz-sistemetakako energia potentzial eskuragarria energia potentzial osotik adiabatikoki energia zinetiko bilakatu daitekeen kopurua bezala definitu zuen. Lorenz-ek 1955ean Margules-ek proposatutakoa atmosfera osorako hedatu zuen, energia potentzial eskuragarria atmosferako energia potentzial totalaren eta energia potentzial total minimoaren arteko aldea bezala definituz. Energia potentzial eskuragarriaren definizio horrekin, Lorenz-ek atmosferako energia mekanikoen arteko erlazioak finkatu zituen tenperatura eta haize eremuak erabiliz, eta egun “Lorenz-en energia zikloa” bezala ezagutzen dena sortu zuen. Hainbat hurbilketa egin arren, azken horren bidez atmosferaren jokatibideak modu sinple eta eraginkorrean azter daitezke. 1964an, Oort-ek hurbilketa horien beharrik ez zeukan Lorenz-en teoriaren garapen bat egin zuen, *mixed space-time domain* deritzon eremua definituz. Oort-ek sortutako formulazioa da orduetik gehien erabili dena, eta lan honetan ere hala egingo da.

Lan hau Lorenz-ek finkatutako energia potentzial eskuragarriaren azterketan zentratuko da, Oort-ek garatutako formulazioarekin lortutako hainbat emaitza behatuz. Datorrena ulertzeko oinarri teorikoa azalduko da lehenik, emaitzak lortzeko erabilitako estrategiak eta metodologiarekin jarraituz. Behin hori jakinda, energia potentzial eskuragarriaren banaketa espazialak aztertuko dira, latitude-presio eta longitude-latitude erako banaketekin; ondoren ENSO zikloak (bereziki *El Niño* zikloak) eta energia potentzial eskuragarriaren aldaketak dituzten erlazioak ikusiko dira, eta, emaitzekin amaitzeko, energia potentzial eskuragarriaren balio osoek dituzten joerak erakutsiko dira klima aldaketarekin duten erlazioa ikustarazteko. Guztia ixteko, lanarekin izandako arazoak eta hobekuntza batzuk aipatuko dira, ondorioekin amaituz.

1. Kapituluia

Oinarri teorikoa

Zikloi, antizikloi eta hainbat sistema atmosferikoen indartzea edo ahultzea sistema horrek daraman energia zinetikoaren arabera denez, interesgarria izan daiteke eguratsak daraman energia zinetikoaren balioa jakitea. Lorenz-ek definitutako energia potentzial eskuragarriak energia zinetiko horren ezagutzara eramanez gaitzake.

Energia potentzial eskuragarriarekin (EPE) hasi baino lehen, atmosferako energiaren portaera (hau da; sorkuntza, transformazioa eta deuseztapena) ezagutzea interesgarria izan daiteke. Hala, zirkulazio orokorrean bete beharreko baldintza batzuk finkatuko dira eta eguratsean gertatzen diren hainbat prozesu fisiko modu sinplean ulertu ahal izango dira. Behin hori jakinda, EPEren propietateak aztertzea errazagoa izango da.

1.1 Atmosferako zirkulazioa

Eguratsean hiru energia mota bereizi daitezke: zinetikoa (zirkulazioak bere higiduragatik daramana), geopotentziala (planetaren eremu grabitatorioak sortua) eta barnekoa (atomo eta molekulek beren bibrazioengatik duten energia termikoa). Idazkera azkartzeko, zinetikoari EZ, potentzialari EP eta barnekoari BE deituko diegu.

Atmosferako zirkulazioa ahalbidetzen duen energia eguzkiak igorritako erradiatibotatik dator. Lurrak (itsaso-egurats-lur sistemak), ordea, ez du xurgatutako energia hori betiko gordetzen, eguratsaren gorenean BE erradiazio infragorri bezala xahutzen baitu. Epe luzean xurgatutako eta xahututako kopuruak berdinak direnez oreka erradiaktiboa lortzen dela esaten da, eta lur planeta etengabe berotzen edo hozten egotea galarazten du horrek. Hala ere, esandako xahutze eta xurgatzeak ez direnez uniformeak atmosfera osoan zehar, eguratsaren zirkulazioa baldintzatuta geratzen da.

Xurgapenari dagokionez, lurraren biraketa-ardatzak eguzkiarekiko duen orientazioa dela eta, eguratsaren goreneko puntu jakin bateko intsolazioa aldatu egiten da urtaroaren arabera. Ez hori bakarrik, lurraren esferikotasunagatik, ezberdina da latitude bakoitzean jasotako azalera unitateko erradiazioa. Espaziora islatutako erradiazioari (albedoari) dagokionez, poloetan da esanguratsuen elurra, izotza eta lainoak direla medio*; eta horrek

*Tropikoetan ere balio handia dauka laino kopuru handiagatik.

ere eragin nabaria dauka erradiazioaren xurgapena kontuan hartzean. Xahuketari dagokionez, aldiz, espaziora igortzen den erradiazioaren maximoa subtropikoetan antzeman daiteke. Zergatik? Bada, poloetan balio hori txikiagoa da tenperatura hotzengatik, eta tropikoetan, aldiz, goi-laino hotzen eta ur-lurrunaren kantitate handiak energiaren iheste hori galarazten du.

Esandako bi prozesuak kontuan hartuz (xurgapena eta xahuketa), latitude guztietan goi atmosferan xurgatutako eta igorritako energien arteko diferentzia kalkulatu bada, tropikoetan balioa positiboa eta poloetan negatiboa dela ikusi daiteke. Ondorio bezala, energia tropikoetatik poloetara garraiatzen dela esan daiteke, bai ozeanoen bidez bai eguratsaren bidez.

Atmosferako energia-trukeak

Eguzkitik datorren erradiazioak ez du eguratsa berotzen zuzenean. Lainorik gabeko atmosfera gardena interakzio gutxirekin pasatu ondoren, ozeanoak eta kontinenteak berotzen ditu nagusiki eta azken horiek BE ematen diote eguratsari, erradiazio infragorri moduan edo gerora kondentsatuko den lurrundutako uraren bidez[†]. Energia-transmisio hori, noski, ezberdina da ingurunearen arabera; ozeanoetan esaterako, uraren bero-ahalmen handiagatik lurrazalean baino askoz motelagoa da prozesua.

Airea eguratseko presio gradienteetan zehar higitzen denean BE EZ bihurtu daiteke (eta alderantziz), eta airea grabitatearen aurka mugitzen denean EZ EP ere bihurtzen da (grabitatearekin mugitzen denean alderantziz). Atmosferaren eta gainazalaren arteko marruskadura indarrak direla eta, EZ bero moduan xahutu daiteke eguratseko BE bihurtzeko eta baita ozeanoetako korronteak eta olatuak indartzeko ere. Aipatutako lehenengo bi energia trukeak adiabatikoak eta itzulgarriak dira, hirugarrena, aldiz, diabatikoa eta itzulezina [2].

Eguratsa sistematzat hartuz eta gainontzekoa unibertso kontsideratuz, gainazal-egurats elkarrekintzak daudeneko prozesuak diabatikoak eta itzulezinak direla ikusi daiteke. Gainazaleko ura lurruntzean, esaterako, masa-trukeak daude sistemaren eta bere ingurunearen artean, baita euria egiten duenean ere. Baina, denbora tarte handi batean itsaso eta kontinenteek eguratsarekin guztira trukutzen duten energia (BE) mulua dela ezagutzen denez [2], denbora jakin baten ondoren eguratsak beroa irabazteko modu bakarra marruskadura bidezko energia zinetikoaren xahutzean datza. Bero horren parte bat eguratsaren BE bilakatzen da.

Ondoren datorren analisisian eguratsa sistema itxitzat hartzeko, gainazalarekin trukutzen den materiak eman (eraman) dezakeen energia inguruneak eragindako berotzea (hoztea) bezala kontsideratuko da, eta, aurreko paragrafoan esandakoagatik, denbora tarte handi batean emandako eta eramandako energia kopurua berdina izango da.

Azkar laburtzearen, eguratsa sistema itxitzat hartu da, non EP-EZ eta BE-EZ energia truke adiabatiko itzulgarriak dauden eta EZ gainazalak eragindako marruskaduragatik

[†]Lurraren barneko beroak eguratsari emandako energia baztergarria da, sumendi aktiboen inguruan izan ezik.

xahutzen den zati bat BE bihurtzeko.

1.2 EPE: Energia potentzial eskuragarria

Atmosferako energia zikloaren ezagutzak hainbat prozesu modu sinplean aztertzea ahalbidertzen du. Teoria horren oinarriak Lorenz-ek [1] (1955 urtean) finkatu zituen, Margules-ek 1903an ekaitz indibidualen energiarentzat egindakoa mundu mailara hedatuz. Azken finean, Lorenz-ek egindakoaren muina atmosferako energia potentzial totaletik EZ bihurtu zitekeen frakzioarentzat ekuazio bat lortzea izan zen, hau da, energia potentzial eskuragarriaren ekuazioa lortzea. Lorenz-ek definitutakoa azalduko da ondoren.

Aurreko azpiatalean aipatutako EZ-BE transformazioak adiabatikoak eta itzulgarriak izanik, norantza bakoitzak probabilitate bera izan beharko lukeela pentsa dezake batek; ikusi dena, ordea, epe luzean marruskadurak xahututako haina EZ sortzen dela izan da [2]. BETik EZrako transformazio horren azterketak zuzenean energia potentzial eskuragarria (EPE) bideratzen du.

Berehalakoa da oreka hidrostatikoa dagoen atmosferako aire lehorreko zutabe bertikal baten barneko BE eta EP proportzionalki transformatzeko direla frogatzea. Masa unitateko energia potentzialtzat gz eta barne energiatzat $c_v T$ hartuz:

$$EP = \int_0^\infty gz\rho dz = \int_0^{p_0} z dp = \int_0^\infty p dz = \int_0^\infty RT\rho dz = \frac{c_p - c_v}{c_v} BE \quad (1.1)$$

$$p_0 = \int_0^\infty g\rho dz \quad (1.2)$$

Hemen g grabitatearen azelerazioa da, ρ aire lehorren dentsitatea, R gas idealen konstantea, p_0 lurrazaleko presioa eta T temperatura. Aire lehorra nitrogeno eta oxigenoz dago osatuta nagusiki[‡], eta atmosferako kondizio arruntetan (presio eta temperatura atmosferikoetan) gas horien izaera idealtzat hartzea hurbilketa ona da. Gainera, kalkuluak asko sinplifikatzen dira.

Argitzeko, oreka hidrostatikoa dagoen aire lehorreko zutabe bateko presio eta alturaren arteko erlazioa $dp = -g\rho dz$ da eta alturaren zerotzat luraren gainazala hartu da, topografia baztertuz.

EP eta BEren proportzionaltasun horregatik, gauzak sinplifikatzeko, energia potentzial totala (EPT) eta energia totala (ET) definituko dira zutabe baterako:

$$EPT = EP + BE = \int_0^\infty c_p T dz \quad (1.3)$$

$$ET = EPT + KE \quad (1.4)$$

[‡] N_2 %78.08, O_2 %20.95, Ar %0.93, CO_2 %0.039...

Aldaketa adiabatikopean (BE-EZ eta EP-EZ transformazioak, esaterako) sistemaren energia totala kontserbatu egiten denez, prozesu adiabatikoetan energia zinetikoaren iturri (edo putzu) bakarrak BE eta EP dira.

Hasiera batean hala badirudi ere, EPT horrek ez du informazio askorik ematen EZ lortzeko eskuragarri dagoen energiari buruz, izan ere, bai sistemari adiabatikoki energia gehitzean bai kentzean (BE igotzen edo jaisten, esaterako), energia zinetikoa lor daiteke. Geruzapen horizontaleko[§] atmosfera izanik (EP minimoa); banaketa horretako puntu bat berotzen (hozten) bada, BE igotzearekin (jaistearekin) batera EPT igoko (jaitsiko) da, baina, puntu horretan berotzeak (hozteak) sortutako dentsitatearen aldaketak geruzapen horizontala distortsionatu dezakeenez, sisteman presio-indar horizontalak agertu daitezke energia zinetikoa sortuz. Beraz, energia kentzearekin eta gehitzearekin, biekin lor daiteke energia zinetikoa.

EZ bihurtu daitekeen energia kopurua finkatzeko Lorenz-ek energia potentzial eskuragarria definitu zuen.

Masa banaketa jakin bateko sistema itxi batean (eguratsa), aldaketak adiabatikoki eginez, geruzapen horizontala eta estatikoki egonkorra den egoera bat lortzen denean sistemaren EPT minimoa izango da, eta, energia totala kontserbatzen denez, EZ maximoa. Energia potentzial eskuragarria ondorengo eran adierazi daiteke:

$$EPE = EPT - EPT_{min} \quad (1.5)$$

EPE guztiz definitzeko atmosferako masaren banaketa jakitea nahikoa da. Aldaketa adiabatikopean $EPE + EZ$ konstante mantenduko da eta EPE beti izango da positiboa. Gainera, lehen esan bezala, EPE minimoa izango da eguratseko masa estratifikazioa horizontala eta estatikoki egonkorra denean. Eguratseko energia potentzial osoarekin alderatuta EPE ren balioa oso txikia da ($\overline{EPE}/\overline{EPT} \sim 1/200$), baina energia zinetikoarekin alderatuta handia ($\overline{EZ}/\overline{EPE} \sim 1/10$)[¶]. $EPE + EZ$ konstantea denez, aldaketa adiabatikoetan energia zinetikoaren iturri bakarra energia potentzial eskuragarria dela esan daiteke.

Behin propietate horiek jakinda, EPE ren adierazpen zehatza erakutsiko da jarraian.

Tenperatura potentzialak (Θ) presio eta tenperatura jakin bateko aire lehorreko partzela batek adiabatikoki p_0 presiora konprimatzean edo hedatzean izango duen tenperatura esaten du. Prozesu adiabatikoetan bere banaketa kontserbatu egiten denez, koordinatu bertikal bezala oso erabilgarria izan daiteke. $G(\Theta)$ k ausaz hartutako masa unitate batek

[§]Geruzapen horizontalarekin dentsitate banaketa uniforme eta horizontala esan nahi da.

[¶]Txapeltxoak azalerako batez bestekoa adierazten du.

Θ jakin bat izateko probabilitatea ematen badu, ondorengo moduan defini daiteke tenperatura potentzial jakin baten gainazaleko presioaren batez bestekoa:

$$\bar{p}(\Theta_1) = \bar{p}_0 \int_{\Theta_1}^{\infty} G(\Theta) d\Theta \quad (1.6)$$

Hau da, Θ jakin bati dagokion presioa, Θ hori baino balio handiagoa duen airearen pisuak finkatzen du. Ekuazioan \bar{p}_0 lurraren gainazaleko presioaren batez bestekoa da eta adierazpen honetarako ere topografia baztertu egiten da.

Θ kontserbatu egiten denez, $G(\Theta)$ eta $\bar{p}(\Theta_1)$ ere kontserbatu egiten dira aldaketa adiabatikopean.

EPT $p(\Theta)$ -ren funtzioan jartzen bada, segituan lortu ahal izango da *EPE*ren adierazpen zehatza. Aurretiaz definitutako masa unitateko *EP* eta *BE*ren adierazpenak erabiliz eta topografia baztertuz, azalera unitateko zutabe batean izango den *EPT* ondorengo da:

$$EPT = \int_0^{\infty} \rho(gz + c_v T) dz = c_p g^{-1} \int_0^{p_0} T dp \quad (1.7)$$

Hori kalkulatzeko oreka hidrostatikoa dagoen aire lehorreko zutaberako definitutako proportzionaltasuna hartu da kontuan (1.1 ekuazioa).

Orain, tenperatura potentziala koordenatu bertikal bezala erabiltzeko $T = \Theta p^\chi p_0^{-\chi}$, $\chi = R/c_p$ eta $d\Theta/dp = -T p_0^\chi \chi p^{-(\chi+1)}$ erabiliz eta jakinik masaren geruzapen horizontala (*EPT* minimoa) $p = \bar{p}$ ordezkatzuz lortzen dela, azalera unitateko batez besteko *EPE*-ren itxura ondorengo da:

$$\overline{EPE} = (1 + \chi)^{-1} c_p g^{-1} p_0^{-\chi} \int_0^{\infty} (\bar{p}^{1+\chi} - \bar{p}^{1+\chi}) d\Theta \quad (1.8)$$

Batez bestekoa tenperatura potentzial jakin baten gainazalean zehar egiten da, hau da, gainazal isentropiko batean zehar.

1.8 ekuazioari energia potentzial eskuragarriaren adierazpen zehatza deitzen zaio, hori bai, kontutan eduki behar da topografia baztertu dela eta baita hurbilketa hidrostatikoa egin dela ere. Ekuazio horren soluzioa lortzea ez denez berehalakoa, integrakizuna seriean garatuko da $p = \bar{p} + p'$ erabiliz. p' -k batez bestekoarekiko desbideraketa adierazten du eta bere batez bestekoa gainazal isentropiko batean (Θ konstanteko gainazala) nulua da. Serieko garapenean azaltzen den lehen terminoa beste guztiak baino askoz handiagoa denez, ondorengo adierazpena lortu daiteke energia potentzial eskuragarriaren batez besteko

horizontalarentzat[†]:

$$\overline{EPE} = \frac{1}{2} \chi c_p g^{-1} p_0^\chi \int_0^\infty \overline{p^{1+\chi} (p'/\overline{p})^2} d\Theta \quad (1.9)$$

\overline{EPE} gainazal isentropikoen inguruko presioaren bariantzaren araberkoa dela ikusi daiteke.

Gainazal isentropikoak ez badira horizontaletik asko aldentzen, p' Θ' -ren (eta, beraz, T' -ren) arabera hurbildu daiteke. Horrela, koordenatu bezala gainazal isentropikoen ordez isobarikoak erabili ahal izango dira, $p \simeq p(\overline{\Theta}(p))$ eta $p' \sim -\Theta'(\partial\overline{p}/\partial\Theta)$ baliatuz^{**}:

$$\begin{aligned} \overline{EPE} &= \frac{1}{2} \chi c_p g^{-1} p_0^\chi \int_0^{p_0} \overline{\Theta^2 p^{-(1-\chi)} (-\partial\overline{\Theta}/\partial p)^{-1} (\Theta'/\overline{\Theta})^2} dp \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{p_0} \overline{T(\Gamma_d - \overline{\Gamma})^{-1} (T'/\overline{T})^2} dp \end{aligned} \quad (1.10)$$

Azken berdintzarako $\partial\Theta/\partial p = -\chi\Theta p^{-1}(\Gamma_d - \overline{\Gamma})\Gamma_d^{-1}$, $\Gamma = -\partial T/\partial z$, $\Gamma_d = g c_p^{-1}$ eta $\Theta'/\Theta = T'/T$ erabili dira. Γ egonkortasun estatikoaren faktorea da, eta bere balioa Γ_d baino handiagoa denean ingurune ezegonkor bat deskribatzen du, txikiagoa denean, aldiz, ingurune egonkor bat. Estratosferan, esaterako, alturarekin batera igotzen denez tenperatura, ingurunea oso egonkorra dela esan daiteke, $\Gamma < 0$ izanik beti beteko baita $\Gamma_d > \Gamma$. Lan honetan egindako hurbilketengatik beti beteko da $\Gamma_d > \Gamma$.

Orain azalera unitateko \overline{EPE} hori lurraren esfera osorako integratuz eta $\gamma = (\Gamma_d - \overline{\Gamma})^{-1} \Gamma_d \overline{T}^{-1} = -(\Theta/T)(R/c_p p)(\partial\overline{\Theta}/\partial p)^{-1}$ egonkortasun-faktorea ordezkatuz adierazpen orokorrako bat lortuko da.

$$EPE = \frac{c_p}{2} \int_0^M \gamma T'^2 dm \quad (1.11)$$

M eguratsaren masa da eta $dm = g^{-1} a^2 \cos\phi d\lambda d\phi dp$, ϕ latitudea zehazten duen angelua eta λ longitudea zehazten duena izanik. g grabitatearen azelerazioa da eta a lurraren erradioa.

Lortutakoa aztertzeko puntu egokia izan daiteke hau. EPE tenperaturaren bariantza horizontalaren menpekota da, altitudearen araberkota den pisu batek (γ) eraginda. Puntu bateko tenperatura zenbat eta gehiago alendu bere presio mailako azalerako batez

[†]Ez da garapen osoa erakutsi azalpena astunegia ez egiteko. Irakurleak [1] lanean aurkitu dezake garapena.

^{**}Interesgarria da ekuazioak gainazal isobarikoen menpe adieraztea, izan ere, datuak presio maila ezberdinentzat eman ohi dira, ez tenperatura potentzial ezberdinentzat.

bestekotik, orduan eta handiagoa izango da EPEri egindako ekarpena. $\gamma \Gamma_d - \bar{\Gamma}$ kenketaren alderantziz proportzionala da, eta kenketa horren balioa txikituz (egonkortasuna txikituz) geroz eta EPE gehiago lortu ahal izango da. Maila bereko aire partzelek tenperatura ezberdina dutenean, aire hotzeko (beroko) eremuek hondoratzeko (igotzeko) joera dute, prozesu horretan atzean uzten duten maila hortako tenperaturak egonkortuz. Egonkortasuna txikia izateak maila bereko tenperaturen ezberdintasuna handia dela esan nahi du, eta horrek tenperatura ezberdineko aire partzelek tenperatura egonkortzeko distantzia handiagoan mugitu beharko dutela adierazten du, hots, EZ handiagoa izango dutela.

Beraz, zenbat eta ezegonkorragoa izan eremu bateko banaketa, orduan eta handiagoa izango da bertatik irtengo den EZ, eta horrek esan nahi du EPE ere handiagoa dela kasu horietan.

1.12 ekuazioak emandako informazioa aztertzeko, EPE espazio eta denborako hainbat osagaietan bana daiteke, Lorenz-ek 1955ean idatzi eta Oort-ek 1967an garatuta bezala [3]. Batez besteko balioekiko desbiderapenei *eddy* deritze, eta, espazioari dagokionez, atmosferan hiru motatakoak agertu daitezke: meridionalak, zonalak eta bertikalak. Denboran definitutako *eddy*-a ere badago. Zonala eta denborazkoa soilik hartzen badira kontuan, tenperatura ondorengo eran deskonposatu daiteke:

$$T = [\langle T \rangle] + \langle T \rangle^* + [T]'' + T''^* \quad (1.12)$$

$[X] = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} X d\lambda$ longitudearekiko batez bestekoa da, $\langle X \rangle = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} X dt$ batez bestekoa denboran, $X^* = X - [X]$ eta $X'' = X - \langle X \rangle$.

Tenperaturaren deskonposaketa horrekin bi EPE mota definitu daitezke: EPE zonala (EPEZ) eta *eddy* EPE (EEPE). Aldi berean, EEPE espazioari dagokion parte batek eta denborari dagokion beste batek finkatzen dute, EEPE iraunkorrak eta EEPE iragankorrak, hurrenez hurren.

$$EPE = EPEZ + EEPE \quad (1.13)$$

$$EEPE = EEPE_{irau} + EEPE_{irag} \quad (1.14)$$

Lan honetan Oort-ek definitutako *mixed space-time domain* erabiliko da, EPEZ finkatzeko 1.13 ekuazioaren eskuineko lehenengo osagaia erabiliz eta EEPE finkatzeko beste osagaiak erabiliz. Konbentzio bat besterik ez da, baina, konbentzioaren arabera balio ezberdinak lortu daitezkeenez osagai bakoitzarentzat, argi utzi behar da zein erabiltzen den.

1.13 1.12 ekuazioan ordezkaturik eta denboran eta longitudeetan zehar batez bestekoak eginaz:

$$[\langle T'^2 \rangle] = ([\langle T \rangle] - \overline{\langle T \rangle})^2 + [\langle T \rangle^{*2}] + [\langle T''^2 \rangle] \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned}
EPE &= EPEZ + EPEE_{irau} + EPEE_{irag} \\
&= \frac{c_p}{2} \int_0^M [\langle T \rangle]'^2 \gamma \, dm + \frac{c_p}{2} \int_0^M [\langle T \rangle^{*2}] \gamma \, dm + \frac{c_p}{2} \int_0^M [\langle T^{*2} \rangle] \gamma \, dm \quad (1.16)
\end{aligned}$$

Azken ekuazio hori izango da lan honetako kalkuluetarako funtsezkoena.

Azpiatal honekin amaitzeko ekuazio horren esanahia aztertuko da. EPEZi dagokionez, latitude jakin bateko batez besteko tenperatura asko aldentzen denean maila hortako azalerako batez bestekotik, bere balioa handia izango da. Hori dela eta, EPEZen balioa handia izatea espero da poloetan eta ekuatore inguruan^{††}. $EPEE_{irau}$, aldiz, handia izango da puntu bateko tenperatura bere latitudeko batez bestekotik aldentzen denean, horregatik, balio handienak ingurune oso ezberdinak dituen latitudeetan izango ditu (topografia asko aldatzen den latitudeetan, hain zuzen ere). Azkenik, $EPEE_{irag}$ handia izango da denboran zehar aldakortasun handia dagoen eremuetan, eta, horregatik, batez bestekoarentzat hartzen den denbora tarteak esangura handia izango du.

Denboran zehar EPEk duen portaera behatuz, klima aldaketarekin duen erlazioa aztertuko da lan honetan. Ez hori bakarrik, *El Niño* urteetan zehar EPE nola aldatzen den ere ikusiko da, hainbat galdera erantzun baitaitezke energiaren ikuspuntutik.

Klima aldaketaren kontua guztiontzat da ezaguna, *El Niño*, ordea, baliteke ezezagunagoa izatea. Azken horren azalpen labur bat emango da ondoren.

1.3 *El Niño*

El Niño, 2 eta 7 urte bitarteko periodoarekin Ozeano Barearen ekuatore ekialdean gertatzen den itsasoaren berotze-prozesuari deritzo. ENSO^{‡‡} zikloaren garai beroari dagokio. Berotze horren ondorio diren prozesu atmosferikoak esanguratsuak dira mundu mailan, baina, batez ere, tropikoetan eta ekuatore inguruan. Azpimarragarrienak Hego Amerikako mendebaldeko kostaldean egon ohi diren euriteak. La Niña deituriko kontrako prozesua ere ikusi daiteke urteetan zehar (ENSOren garai hotza).

Garai arruntetan, ekialdeko haize bortitzek (alisioak) Ozeano Bare tropikalaren gainazaleko ur beroa ekialdetik mendebaldera mugiarazten dute, Amerikako mendebaldeko kostatik Australia eta Asiaren ekialdera, hain zuzen ere. Ur bero hori mendebaldera eramateak ekialdean itsas barreneko ur hotza azaleratzea dakar, eta, horrela, Ozeano Barearen ekialdean itsas gainazalaren tenperatura mendebaldean baino askoz txikiagoa dela neurtu daiteke. Tenperatura ezberdintasunagatik, mendebaldean itsas maila ekialdean baino altuagoa dela ere neurtu daiteke.

El Niño fasean, ordea, alisioak baretu egiten dira, eta urak mendebalderantz mugituaraziko dituen indarrak zeharo ahultzen dira. Aldiz, mendebaldeko ur beroa ekialderantz

^{††}Poloetako tenperatura hotzengatik eta ekuatoreko beroengatik.

^{‡‡}*El Niño-Southern Oscillation*

higitzen hasten da garai horietan, bertako termoklinaren sakonera asko handiagotuz eta ekialdeko sakoneko ur hotzak azaleratzea galaraziz. *El Niño* fasean, ekialdeko gainazaleko ura beroagoa izanik, konbekzio esanguratsuak gertatzen dira eta prezipitazioa asko ugaritzen da bertan, ekialdean. Mendebaldean, ostera, gainazaleko uraren tenperatura baxuagoak lehortek ekar ditzake inguru horietan.

Hori gutxi balitz, Ozeano Barearen gaineko eguratsaren portaera aldatzeaz gain, *El Niño* urteetan zehar atmosferaren zirkulazio globala ere asko aldatzen da, beraz, *El Niño* mundu mailan du eragina. Lan honetan, atmosferako tenperaturan eta EPEren balioan duen eragina aztertuko da.

Atmosferako energia trukeen, EPEren eta *El Niño* prozesuaren ideia orokor bat izanik, lana ongi ulertzeko, testu osoan zehar erabiliko diren datuen jatorria zein den jakitea ez da gaizki etorriko.

1.4 Erreanalisi

Azken urteotako behaketa metodoen aniztasuna dela eta, egungo atmosferaren ezagutzaren oso aberatsa da, bere osotasunean nahiko ondo ezagutzen da. Urte batzuk atzera joatean, ordea, datutegi originaletan geroz eta hutsune gehiago ageri direla antzeman daiteke. Erreanalisiaren lana hutsune horiek betetzea da.

Egungo modelo matematikoez baliatuz posiblea da hutsune horiek osatzea, ERA5-ek (lan honetan erabiliko den datutegia), esaterako, 4D-VAR izeneko teknika erabiltzen du horretarako. Teknika horren helburua, fisikaren legeak jarraituz, eskuragarri dauden datu guztietatik pasatzen den funtziorik egokiena definitzea da, horretarako hasierako baldintza egokienak finkatuz. Hasierako baldintza egokirik gabe ezin da estimazio onik egin. Azken finean, labur azalduta, modelo atmosferikoentzat hasierako balio batzuk finkatu eta hortik lortzen diren emaitzak benetako datuekin alderatuz, hasierako balio egokienak finkatzean datza teknika hori.

Hurrengo atalean lan honetako emaitzak lortzeko jarraitutako pausuak erakutsiko dira.

2. Kapituluia

Metodologia

EPE lortzeko erabili diren hilabeteroko atmosferako tenperaturaren datuak ERA5 errealisiaz emandakoak dira [4]. Bertan 1979ko urtarriletik 2019ko abendurainoko tenperaturaren hilabeteroko batez bestekoen informazioa dago eskuragarri, eta lan honetan 1.0° x 1.0° -ko bereizmen horizontalekoak eta 21 presio mailetakoak* erabili dira. Estrapolazio baten bidez, lur-azpiko datuak ere azaltzen dira ERA5 datutegian. 1979tik aurrera lortutakoak direnez, satelite modernoan garaiko datuak landu dira.

Topografia aztertzeko gainazaleko presioaren balioak erabili dira ([5]) aurreko bereizmen horizontal berberarekin.

Teoria finkatu zenetik badira hainbat lan Lorenz-en energia zikloa, eta, beraz, energia potentzial eskuragarria aztertzen dituztenak. Emaitzen alderaketarako lan horietako bat aukeratzea ez da erraza ordea; neurketen zehaztasuna eta datuen aniztasuna asko aldatu da denbora tarte honetan, lan bakoitzean erabiltzen den espazioko eta denborako erresoluzioa ere ezberdina da, eta topografia kontutan hartzeko metodoak ere asko aldatzen dira batetik bestera. Badaude hemen erabilitakoaren Oort-en konbentzio[†] ezberdinak erabiltzen dituzten lanak ere.

Lortutako emaitzak alderatzeko *Lorenz energy cycle of the global atmosphere based on reanalysis datasets* ([6]) erabili da erreferentzia gisa, bertako material gehigarrian ageri diren urteroko ebaluazioko emaitzak kontuan hartuz. Ezberdintasunak egotea ez da harritzekoa izango, hainbat faktore ezberdinak baitira: artikuluan erresoluzio horizontala 2.5° x 2.5° -koa da, datutzat ERA40ek eta NCEP2k emandako eguneroko balioak erabiltzen dira eta azterketa 1979-2001 bitartean egiten da. Ez hori bakarrik, integral globalak egitean topografia kontuan hartzeko (atmosferako masa banaketa jarraitzeko), artikuluan Oort-ek 1983 urtean deskribatutako biderkadura faktore batzuk erabiltzen dituzte, hemen, ordea, aurrerago ikusiko den beste bide bat jarraitzen da. Beste bi, hobeto esateko. Datorren azpiatalean ikusiko dira.

*1000, 975, 950, 925, 900, 875, 850, 825, 800, 775, 750, 700, 600, 500, 400, 300, 200, 100, 50, 20, 10 hPa.

[†]EPEZ eta EEPE definitzen dituztenak.

2.1 Analisi espaziala

Atal honetan energien banaketa espaziala aztertuko da, 1979 eta 2020 artean batez besteko banaketak azalduz.

Hemen EPE-ren urtekako ebaluazioa egin da, hau da, denboraren batez bestekoak urtez-urtekoak izan dira, eta bariantzak kalkulatzeko hilabete bakoitzeko balioa dagokion urteko batez bestekotik zenbat aldendu den azertu da. Ondoren, noski, balio guztien batez bestekoa egin da banaketa espazialak lortzeko. Zikloiak edo antizikloiak bezalako prozesuak behatzeko eraginkorragoa zitekeen eguneroko datuak erabiltzea eta batez bestekoak hilabetea egitea, baina, hemen jarraitutakoarekin, urte bakoitzeko energia zikloen ezaugarriak aztertzeke aukera dago. Hautatutako denborako batez besteko motak aurrez definitutako *eddy* horien portaera baldintzatuko du, batez bestekoak modu batean edo bestean egitean EEPE energientzat balio ezberdinak lor baitaitezke.

EPEZen banaketa latitudearen, presioaren eta denboraren arabera da; EEPErena, aldiz, longitudearen menpekota ere bada[‡]. EEPErentzat longitudearekiko batez bestekoa kalkulatu, latitude, presio eta denboraren arabera aztertuta egin ahal izango da, EPEZekin bezala, hain zuzen ere. Aldiz, lehenik presioarekiko integratzen bada, *eddy* energien banaketa horizontala irudikatu ahal izango da, energia mota horren lurrazaleko parte aktiboenak ikustaraziz. Latitude guztietarako batura egiterakoan puntu bakoitzeko datuen garrantzia eta lurraren esferikotasuna kontutan hartzeko, $\cos\phi$ latitudearen kosinua erabili da pisu moduan. Integral guztiak egin ostean, azalera unitateko energiaren balioa lortzeko lurraren azalera zatitu da emaitza, eguratsaren lodiera planetaren erradioarekin alderatuta baztergarria dela kontutan izanik.

Integral horiek kalkulatzeko orduan, hainbat lanek Lorenz-ek egindako lurrazal horizontalaren hurbilketa gogorregia dela diote; Oortek, esaterako, hori ekidinez latitudearen arabera biderkadura faktore batzuk erabiltzen ditu eguratsaren masa banaketa kontutan hartzeko. Beste modu batera esanda, topografia kontutan hartzeko. Hemen, presioa koordenatu bertikal bezala erabili da energien kalkuluak modu sinplean egiteko; sinpletasun hori, ordea, desagertu egiten da gainazaleko presioaren mugalde baldintza dagoenean, bere balioa asko aldatzen baita gainazaleko puntutik puntura[§]. Gainazaleko muga baldintzaren ϕ , λ eta t -rekiko menpekotasunak energiak lortzeko integralen kalkuluak asko zailtzen ditu.

Topografiarekin kalkuluak egiteko eta lortzen diren emaitzen zuzentasuna bermatzeko, bi metodo aplikatu dira lan honetan:

1.metodoa

1.11 ekuazioan erabili den masarekiko integralak ondorengo itxura dauka:

$$\int_0^M dm = \int_0^{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{p_s} g^{-1} a^2 \cos\phi \, d\lambda d\phi dp \quad (2.1)$$

[‡]1.18 ekuazioan batez besteko zonalak kontutan hartu gabe.

[§]Denboran zehar ere badaude aldaketak, baina gutxiago.

Lorenz-en hurbilketarekin, $p_s = p_0 = kte$ definitu da. Topografiagatik, ordea, $p_s = p_s(\phi, \lambda, t)$ da, eta horrek zailtasunak dakartza integralak eta batez bestekoak egiterakoan. Lur-azpiko datuak saihesteko, Boer-ek [8] 1982 urtean ondorengo eran definitutako β faktorea erabiliko da:

$$\beta = \begin{cases} 0 & ; p > p_s \\ 1 & ; p \leq p_s \end{cases} \quad (2.2)$$

Beta faktore horrek lurrazpiko puntuei zero balioa ematen die, eta ekuazioetan modu egokian sartuz gero, integralak egiterako orduan mugalde baldintza konstante bat erabiltzea ahalbideratuko du, eta, aldi berean, integrakizunaren lurrazpiko ekarpenak baztertuko ditu. Modu egokian sartzearekin batez bestekoak eta integralak egitean lurrazpiko balioen zeroak kontuan hartzea esan nahi da. Integrala egiterakoan, beraz, ez du axola (ϕ, λ, t) bakoitzeko gainazaleko presioak, hautatutako mugalde baldintza konstantearen (p_{muga}) eta $p_s(\phi, \lambda, t)$ -ren arteko balio guztiak betak baliogabetzen baititu. Nahikoa da, beraz, $p_{muga} > p_s(\phi, \lambda, t)$ presio bat hartzea integralak egiteko (lan honetan $p_{muga} = 1000hPa$ [¶]).

Esan bezala, beta horrek batez bestekoen eta desbiazioen adierazpenak apur bat aldatzen ditu:

$$\langle X \rangle^R = \begin{cases} \langle \beta X \rangle / \langle \beta \rangle & , \langle \beta \rangle \neq 0 \\ \langle X \rangle & , \langle \beta \rangle = 0 \end{cases} ; X = \langle X \rangle^R + X'' \quad (2.3)$$

$$[\langle X \rangle]^R = \begin{cases} [\langle \beta X \rangle] / [\langle \beta \rangle] & , [\langle \beta \rangle] \neq 0 \\ [\langle X \rangle] & , [\langle \beta \rangle] = 0 \end{cases} ; X = [\langle X \rangle]^R + X'' + \langle X \rangle^* \quad (2.4)$$

Bi horiek adierazi dira adibide simple bat jartzeko, baina 2.3 ekuazioan denborazko batez bestekoaren orde zonal edo azalerakoa jarrita (eta dagozkien eskuineko deskonposaketak jarrita) berdin funtzionatzen du adierazpenak. Baita 2.4 ekuazioan zonalaren orde azalerakoa jarrita ere. 1.11 ekuazioko EPErentzat T' metodo berri honekin ordezkatzuz eta γ faktorea berdefinituz, ondorengo adierazpenetara iritsi daiteke:

$$EPEZ = \frac{c_p}{2} \int_0^M [\langle \beta \rangle] [\langle T \rangle]'^2 \gamma \, dm \quad (2.5)$$

$$EEPE_{irau} = \frac{c_p}{2} \int_0^M [\langle \beta \rangle \langle T \rangle^{*2}] \gamma \, dm \quad (2.6)$$

$$EEPE_{irag} = \frac{c_p}{2} \int_0^M [\langle \beta \rangle \langle T^{m2} \rangle] \gamma \, dm \quad (2.7)$$

$$\gamma = -(\Theta/T)(R/c_p p)(\partial \bar{\Theta}^R / \partial p)^{-1} \quad (2.8)$$

[¶]Badaude $p_s(\phi, \lambda, t) = 1000hPa$ baino handiagoak diren gainazaleko presioak, baina lan honetan presio horientzat ez dagoenez daturik, ez diote ekarpenik egingo integralari.

Adierazpen horietan gainazaleko muga konstante bat hartu daiteke presioarentzat, lehen esan bezala $p_{muga} > p_s(\phi, \lambda, t)$ izanik beti. Definizio horiekin, integral bertikalak zuzenean kalkulatu ahal izango dira isobaretan zehar metodo numerikoak erabiliz (lan honetan erabili den Simpson-en erregela, esaterako) eta, lur azpiko balioak baztertuz, emaitza zuzenago bat lortu ahal izango da. Gainera, energien banaketa espazialak azaltzerakoan metodo hau ezin hobea da topografiaren eragina ikusteko.

2.metodoa

Irudi egokiak egin arren, aurrekoak badauka arazo bat integralaren balioari dagokionez. Maila isobariko bat lurrazalaren gainetik edo azpitik dagoen esaten digu betak, baina gainazalaren presio maila zehatzaren informaziorik ez du jasotzen. Hori kontuan hartzen duen metodoa da bigarrenago hau, hori bai, irudikatzerakoan ez da aurreko metodoa bezain eraginkorra.

Integral bertikala egiteko, gainazaleko presioak kontutan hartuz zutabe bateko presioen diferentziak definitu eta Riemannen batura egitea da helburua. Lurrazaletik hasita, lehenengo presio-diferentzia $dP_1 = P_s - \frac{P_1+P_2}{2}$ da, azken maila hartzen duen presio diferentzia $dP_N = P_{N-1} - P_N$ (N tarte kopurua izanik) eta tarteko diferentziak $dP_2 = \frac{P_1-P_3}{2}$; $dP_3 = \frac{P_2-P_4}{2}$; ... ; $dP_n = \frac{P_{n-1}-P_{n+1}}{2}$.

dP horiek 0 dira gainazaletik behera eta longitudearen eta latitudearen arabera aldatu egiten da beren banaketa, eta baita, gutxiago bada ere, denboran zehar. Metodo honetan aurreko beta faktore horrek nolabait parte hartzen du lurrazpiko balioak zerotzeko, hori bai, ez dauka eraginik batez bestekoak egiterakoan. Bide hau jarraituz, aurrekoarekin alderatuz, presio banaketa zehatzagoak lortzen dira integralak egiteko.

dP bakoitzari dagokion tenperaturaren balioa dP horren tarteko maila isobarikoari dagokiona izango da, eta Riemannen baturen bidez berehalakoa izango da soluzioak aurkitzea. Metodo honekin balio zuzenagoak lortuko dira integralentzat, baina, hala ere, irudikatzerakoan, Boer-en metodoak informazio gehiago eman dezake. Emaitzen balioak oso antzekoak dira, beraz, bi metodoak erabiltzeak gehienbat latitude-presio grafikoetan topografia kontutan hartzeak daukan eragina ikusteko balioko du.

Analisi espazialaren atalarekin amaitzeko, aipatu ipar hemisferioko (IH) eta hego hemisferioko (HH) energien ekarpenak ere kalkulatu direla, horretarako integralak egiterakoan latitudearen angeluaren mugak $(0, \pi/2)$ eta $(-\pi/2, 0)$ bezala hartuz, hurrenez hurren. Integralen limiteak mugatzeak batez bestekoen eremua ere aldatzea ekartzen du, eta kontutan izan behar da kalkulu horiek egiterakoan γ faktorearen balioa ere aldatu egiten dela.

2.2 Denbora-analisisa

Energien balioak denboran aztertzerako orduan bada aldaketa garrantzitsu bat espazioan aztertu direneko metodoarekiko. Lehen, denboran eginiko batez bestekoak urtekakoak ziren eta, ondorioz, denborari dagokionez, 41 balio ezberdinetarako soilik lortzen ziren energien balioen emaitzak, 41 urterentzako balioak hain zuzen ere (1979-2020). Energien balioek denboran zehar jasaten dituzten aldaketak antzemateko gutxiegi da datu kopuru hori.

Konponbide bat hilabeteroko batez besteko datuak erabili beharrean egunerokoak erabiltzea litzateke, eta batez bestekoak hilabetea hartu. Hori, ordea, konputaziorako neketsuegia da, bai kalkuluak egiteko bai datuak gordetzeko.

Horregatik guztiagatik, denborako batez besteko bezala *moving average* deritzon teknika erabiliko da. Hilabete bakoitzaren aurreko eta ondorengo sei hilabeteak kontutan edukiz kalkulatu dira denboraren batez bestekoak, horrela, amaieran 41 datu soilik izan beharrean 480 izango dira, 41 urtetan dauden hilabete kopurua ken hasierako eta amaierako sei hilabeteak ($41 \times 12 - 2 \times 6 = 480$), hain zuzen ere. Aipatzekoa da $EEPE_{irag}$ en kasuan 468 balio izango direla, denboran batez bestekoa bi aldiz egiten baita. *Moving average* horrek datuen zarata leuntzen lagunduko du eta energien joerak garbiago aztertu ahal izango dira. Hori bai, laginak ez dira independenteak izango eta denbora-tartearen mugetako balioak ere desagertu egingo dira.

Denbora-analisiak egiterakoan sarritan denbora-serietatik urteko sasoi ezberdinetako zikloak, batez besteko balioak eta joera linealak ezabatzen dira anomaliak soilik aztertzeko. Urteko sasoiak aipatutako *moving average* delakoarekin kendu daitezke, batez bestekoak ezabatzeko 41 urteetan zehar hilabete bakoitzaren batez bestekoa kalkulatu da eta dagokion hilabeteari balio hori kenduko zaio (anomaliak lortuz) eta, azkenik, joera lineala ezabatzeko erregresio lineala erabiliko da, karratu txikiaren erregresioa, hain zuzen ere.

Energien portaeran klima aldaketaren eraginik dagoen edo ez ikusteko ezinbestekoa da denbora serieak esan bezala aztertzea. Ez hori bakarrik, aztertuko diren 41 urteetan zehar *El Niño* zikloaren oszilazioak ere zarata nabarmena dira klima aldaketaren eragina garbi ikusteko, beraz, *El Niño* zikloak ere identifikatu behar dira. Hori bai, aurreko atalean ikusi den bezala, bere periodikotasuna ez da batere ongi ezagutzen, eta denbora serieetan ezer kendu baino lehen komeni da *El Niño*-taz eta energietan duen eraginaz gehiago jakitea.

2.3 *El Niño*

El Niño urteak zeintzuk diren jakiteko, Niño-3.4 deritzon eremuko itsasazaleko tenperaturaren anomaliak neurtuko dira[†]. Eremu hori 5°S – 5°N , 170° – 120°W tartean dago eta erabiliko den datutegiak [5] 1° -ko erresoluzio horizontalarekin ematen ditu bertako balioak. “Niño-3.4 SST index” deritzona kalkulatu da datu horiekin, eta aurrerago urte

[†] “SST anomaliak” deituko zaie, *Sea Surface Temperature*-tik eratorria.

jakin bat *El Niño* prozesuari dagokion edo ez zehaztu ahal izango da indize horren ezagutzarekin. Kalkuluen zuzentasuna bermatzeko indize ofizialak ere badaude [9], ERSST** datutegitik ateratako balioekin kalkulaturak.

Lan honetan, aipatutako indize ofizialak lortzeko egiten duten moduan, bost hiruhilekotan edo gehiagotan jarraian $+0.5^{\circ}\text{C}$ baino gehiagoko SST anomaliak dauden garai bat *El Niño* garaiari dagokiola esango da. Beste garai batzuetan baliteke SST anomalia altuak egotea, baina hurrengo hiruhilekotan jarraitasunik ez badaukate, ez dira kontutan hartuko. Aurreko baldintza berdinekin, $+0.5^{\circ}\text{C}$ -koak izan beharrean -0.5°C -ko anomaliak baldin badaude, *La Niña* garaiari dagokiola esaten da, hori bai, lan honetan energien aldaketak aztertzean *El Niño* faseak soilik aipatuko dira.

SST anomaliak lortzeko, beraz, *Niño-3.4* eremuko gainazaleko uraren tenperaturaren batez bestekoak kalkulaturak dira lehenik, ondoren hilabete bakoitzaren 1979 eta 2020 bitarteko batez bestekoak egingo dira eta balio horiek SSTren espazioko batez bestekoei kenduko zaizkie. Horrekin hilabete bakoitzerako SST anomaliak finkaturak dira, eta gero, hiruhileko bakoitzerako balioak lortzeko, 3 hilabeteko *moving average* erabiliko da.

SST anomaliak atmosferako energiek zerikusirik duten edo ez jakiteko bakoitzaren funtzioak konparatu beharko dira. Bi denbora-serieen arteko erlazioa ez denean begi bistakoa, korrelazio gurutzuarekin bi funtzioak elkarri zeinen ondo egokitzen diren jakin ahal izango da, elkarren arteko erlazioa ausazkoa den hala ez ikusiz eta emaitza onena eman dezakeen bata bestearekiko desplazamendua erakutsiz. Lan honetako datuen denbora serieetan, esaterako, datuak hilabeteka emanda daudenez, desplazamendu hori hilabete kopurutan neurtuko da, hau da, denbora serie baten atzerapena bestearekiko hilabetetan emango da.

Korrelazioa kalkulatu baino lehen, ezinbestekoa da bai SST anomaliari eta baita energien serieei ere denboran zehar duten joera kentzea. Klima aldaketak itsasoko eta eguratseko tenperaturaren igoera dakarrenez, joera amankomun horrek bi funtzioen arteko korrelazioa puztea dakar eta ezinbestekoa da hori ezabatzea emaitza fidagarriak lortzeko. Behin hori eginda, korrelazioaren baliorik handiena ematen duen atzerapena kalkulaturak da. Horretarako, luzera bereko bi serie hartuko dira eta bata bestearekiko desplazaturak da kasu bakoitzerako korrelazioaren balioak lortuz. Korrelazioaren balio horiek lortzeko, atzerapena kontutan hartuz, bi serieetan parekatuta dauden balioak elkarrekin biderkatuko dira eta biderkadura guztien batura egin^{††}. Biderkadura horien guztien baturak emango du korrelazioaren balioa; zenbat eta handiagoa izan balio hori, orduan eta korrelazio handiagoa izango dute bi serieek. Korrelazioaren balio maximoa lortzen deneko atzerapena izango da hortik aterako den informaziorik garrantzitsuena.

Behin atzerapena jakinda, korrelazioaren esangura aztertuko da Pearson-en korrelazio koefizientea eta p-balioa kalkulaturak. Korrelazio koefiziente horrek bi datu multzoren arteko korrelazio lineala adierazten du eta -1 eta 1 artean edozein balio hartzen du. Korrelazio koefizientea positiboa denean aldagaietako batek gora egiten duenean besteak ere hala egingo du (modu linealean), negatiboa denean, aldiz, batak gora egitean besteak behera

** *International Comprehensive Ocean-Atmosphere Dataset*-etik aterata (ICOADS)

†† Desplazamenduetatik serieetako hainbat puntu desparekatuta egongo dira, beren ekarpena korrelazioari nulua da.

egingo du. 0 korrelazio koefizienteak bi aldagaien joeren artean ez dagoela erlazio linealik esan nahi du, eta 1 edo -1etik zenbat eta gertuago egon, orduan eta nabariagoa da bi datuen arteko erlazioa. p-balioak korrelazio koefizientea 0 izanik lortutako denbora seriea lortzeko probabilitatea esaten du, hau da, lortutako denbora seriea ausaz lortzeko probabilitatea ematen du. Probabilitate hori % 5 baino txikiagoa bada, korrelazio koefizientea estatistikoki esanguratsua dela esan ohi da.^{‡‡}.

Pearson-en korrelazioa aplikatu ahal den edo ez ikusteko, funtzioen *scatter plot*-ak edo sakabanatze grafikoak aztertuko dira. Datuen banaketek lerro zuzeneko izaera izan behar dute, eta hurbildutako lerro zuzenaren inguruko puntuen banaketak uniformeak izan behar du lerro osoan zehar. Geroz eta puntu gehiago egon ohiko banaketatik at, orduan eta okerragoa izango da Pearson-en korrelazioak emandako emaitza.

Ondorengo adierazpenaren bidez lor daiteke korrelazio koefizientea.

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)}{\sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right] \left[N \sum_{i=1}^N y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)^2 \right]}} \quad (2.9)$$

r = Pearson-en korrelazio-koefizientea

N = korrelazioan aztertzen den pare kopurua

$\sum_{i=1}^N x_i y_i$ = Parekatutako balioen biderkaduraren batura

$\sum_{i=1}^N x_i$ = Parekatzeko erabiltzen diren x osagaien batura

$\sum_{i=1}^N y_i$ = Parekatzeko erabiltzen diren y osagaien batura

Erraz ikusi daitekeenez nolakoak diren karratuen adierazpenak, ez da gehiago jarraituko. Lanaren amaieran hitz egingo da gehiago metodo hontaz.

Behin *El Niño*ren portaera hobeto ezagututa, denbora analisietatik bere eragina identifikatzea eta, horrela, ezabatzea izango da hurrengo helburua, eta, horretarako, ENSO zikloen eta atmosferako EPEren arteko erlazioa lineala dela onartuko da. Hau da, EPE SST anomaliekin linealki aldatzen dela onartuko da. Emaitzetan ikusiko da, guztiz zuzena ez izan arren, hurbilketa hori nahiko egokia dela.

Esan bezala, klima aldaketak sortutako tenperaturen igoeratik, SST anomaliak eta

^{‡‡}p-balioa korrelazio koefizientearen eta datu kopuruaren arabera da, geroz eta datu gehiago egon orduan eta txikiagoa izango da p-balioa. Lan honetan datu asko erabiltzen direnez (~ 492 denbora puntu), p-balioa txikia izatea espero da.

EPEren balioek nolabaiteko igoera izan dezakete. ENSO zikloak kentzerakoan, beraz, beharrezkoa da igoera horien independenteak diren balioak identifikatzea, ENSO zikloena ez den beste ekarpenik ez kentzeko denbora serieei. Ondorengo prozedura jarraituko da:

$$\begin{aligned} EPE_{anom} &= at + bSST_{anom} + c \\ EPE_{anom}^* &= EPE_{anom} - at = b(SST_{anom}^* + a't) + c \end{aligned} \quad (2.10)$$

a -k (a' -k) EPE_{anom} en (SST_{anom} en) denborarekiko menpekotasun lineala finkatzen du, b -k SST_{anom} anomaliarikiko menpekotasuna eta c kontutan edukiko ez diren gainerako prozesuen eragina da, hondarra, hobeto esanda. Izartxoak duten adierazpenek ez dute denboraren menpeko osagairik, eta beren arteko erlazio lineala aztertuz (karratu txiki-en metodoarekin), EPE anomaliari (eta, beraz, EPEri ere bai) ENSO zikloen ekarpena kendu ahal izango zaie. Ekarpene hori kentzeko aipatutako korrelazio gurutzatuak eta atzerapenak kontutan izango dira.

Lehen aipatutako *moving average*-kin maiztasun altuko zikloak (urteko sasoiak, esaterako) ezabatu dira, oraingo azalpenarekin ENSO zikloak ezabatu daitezke eta dauden banaketei batez besteko balioak kentzen bazaizkie, horrekin guztiarekin joera-analisi egoki bat egin ahal izango da. Egia da zehaztasun handiago baterako beste hainbat fenomeno ere hartu daitezkeela kontuan; sumendi aktiboen ekarpena eta ENSO baino ahulagoak diren hainbat patroik klimatologikoren eragina, esaterako, baina lan honetarako ez dira kontuan hartuko.

Aipatu SST anomaliarekin batera EPEren balioak aztertzeko ezinbestekoa dela energien datu kopurua handia izatea, beraz, batez bestekoak egitean *moving average* erabili izanak garrantzi handia dauka.

2.4 Tresnak

Lortutako emaitza guztiak lortzeko Python tresna konputazionala erabili da, eta banaketen irudiak egiteko Panoply softwarea. Irakurleak bibliografian ([14]) eskuragarri dauka sortutako kodea.

Esan bezala, kendutako ENSO ziklo horiek ez dute denborarekiko joerarik.

3. Kapituluia

Emaitzak

Kapitulu honetan kalkulaturako guztia azaleratuko da. Lehenik, aipaturako energia potentzial eskuragarrien banaketa espazialak erakutsiko dira, 1979tik 2020ra izandako batez besteko banaketak erakutsiz. Ondoren, *El Niño* fenomenoaz aztertuko da SST indizeak kalkulatu eta atmosferako tenperaturarekin eta energien balioekin duten lotura erakutsiz eta, azkenik, energien denbora-serieak erakutsiko dira klima aldaketaren eragina aztertzeko.

3.1 EPEren balio osoak

Aurreko ataleko prozedurak eta adierazpenak jarraituz, energia potentzial eskuragarri ezberdinentzat denbora tarte osorako (1979-2020) lortutako balioen batez bestekoak (azalera unitateko) honakoak dira:

	Osoa (1)	Osoa (2)	IH (1)	IH (2)	HH (1)	HH (2)
EPEZ	37,86	37,37	34,73	33,56	40,99	41,02
$EEPE_{irau}$	1,03	1,06	1,26	1,27	0,79	0,84
$EEPE_{irag}$	6,41	6,66	8,87	8,99	3,94	4,22

3.1. Taula: Azalera unitateko energien balioak. Atmosferaren lodiera luraren erradioarekin alderatuta arbuigarria da (Lurraren erradioa 6000km-koa da eta atmosferako 10hPa maila 15km-ko altuerara dago). (1) Boer-en metodoari dagokio eta (2) 2. metodoari. IH = Ipar Hemisferioa, HH = Hego Hemisferioa. Unitateak: $10^5 J/m^2$.

Lehen aipatu bezala, emaitza hauetan baliorik fidagarrienak 2. metodoarekin lortutakoak dira, hori bai, bi metodoekin lortutako emaitzak oso antzekoak direla ikusi daiteke.

Energia potentzial eskuragarri zonala *eddy* energien batura baino askoz handiagoa dela antzeman daiteke. Zonala denboran eta espazioan eskala handikoak diren fenomenoek dagokie, *eddy*-ek aldiz eskala txikiko aldaketak islatzen dituzte.

Ipar eta hego hemisferioetako balioen ezberdintasunak ez dira arbuigarriak. EPEZen

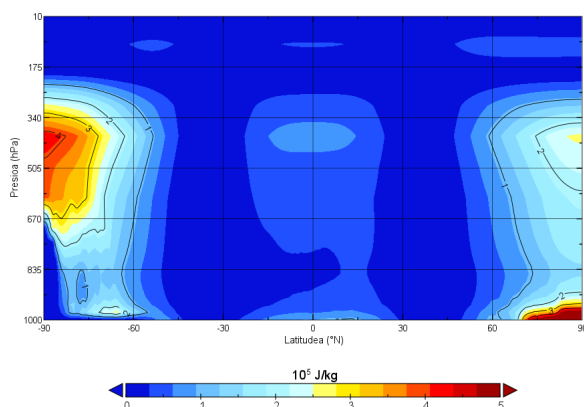
balioa, esaterako, askoz txikiagoa da ipar hemisferioan. Latitude bateko batez besteko zonalaren eta azalerako batez bestekoaren diferentziak finkatzen du balio hori, eta kontinente Antartikoan (HH) dagoen tenperatura Ozeano Artikoan (IH) dagoena baino hotzagoa denez, diferentzia hori handiagoa da hego hemisferiorako eta, ondorioz, EPEZen balioak ere handiagoa izan behar du.

EEPE iraunkorrarentzat eta iragankorrarentzat, ordea, aurkakoa gertatzen da. Ipar hemisferioan balioak handiagoak dira. Horren atzean egon daitekeen arrazoi nagusienetako bat hemisferio bakoitzean dagoen kontinente edo ozeano kopurua izan daiteke. Ipar hemisferioan, eremu kontinental gehiago egonik, homogeneotasun gutxiago dago hemisferioan zehar eta horrek *eddy* gehiagoren sorkuntza sustatu dezake.

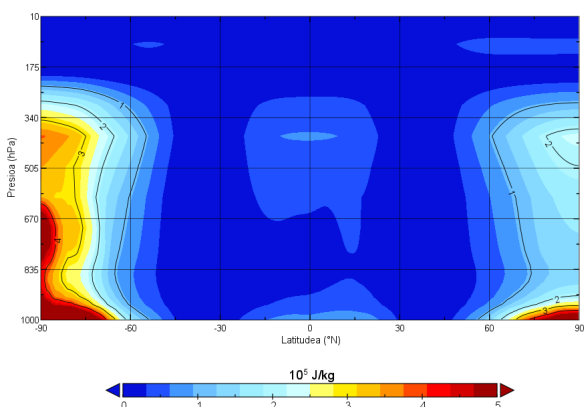
3.2 Analisi espaziala

EPEZ

Banaketa espazialarentzat 3.1 eta 3.2 irudikoak lortu dira.



3.1. irudia. EPEZen batez besteko banaketa latitudearen eta presioaren funtzioan, 1.metodoa erabiliz.



3.2. irudia. EPEZen batez besteko banaketa latitudearen eta presioaren funtzioan, 2.metodoa erabiliz.

Definizioagatik, EPEZ handia izango da latitude jakin bateko tenperaturen batez besteko balioa azalerako batez bestekotik asko aldentzen denean, eta, tenperatura gradiente horizontalik handienak lurrazal inguruan (1000 hPa) ikusi daitezkeenez*, aldentze hori gainazaletik gertu nabariagoa dela ikusi daiteke. EPEZen baliorik handienak latitude altuetan daudela ikusi daiteke, esan den bezala, bertako tenperatura hotzak asko aldentzen baitira batez besteko globaletik. Ekuatore inguruan ere antzeman daiteke zerbait, gainazala berotzen duen eguzkiaren erradiazioaren maximoa hor inguruan baitago.

Bi metodoak alderatuz, lehenengoak lurrazpiko balioak baztertzen dituela ikusi daiteke, bigarrenak, aldiz, datutegian dauden estrapolatutako balioak erabiltzen ditu lurrazal

*Lurrazalaren eta itsasoaren bero-ahalmenen ezberdintasunek zeresan handia dute horretan, baita ebaporatze prozesuek ere.

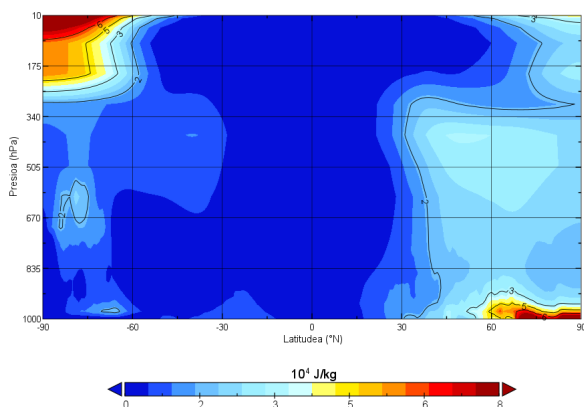
leu batentzat lortu daitezkeen emaitzak ikustaraziz. Ezberdintasunak Hego Poloan (-90°N) dira nabariena, kontinente Antartikoko gainazaleko presio baxuen eragina ikusi baitaiteke.

Kasu honetan bi metodoen bidez lortutako emaitzak erakutsi dira ezberdintasunak ikusteko; baina, lehenengo metodoarekin topografiaren eragina garbi ikusi daitekeenez, hemen dik aurrera erakutsiko diren banaketak lehenengo metodoarekin lortutakoak soilik izango dira[†].

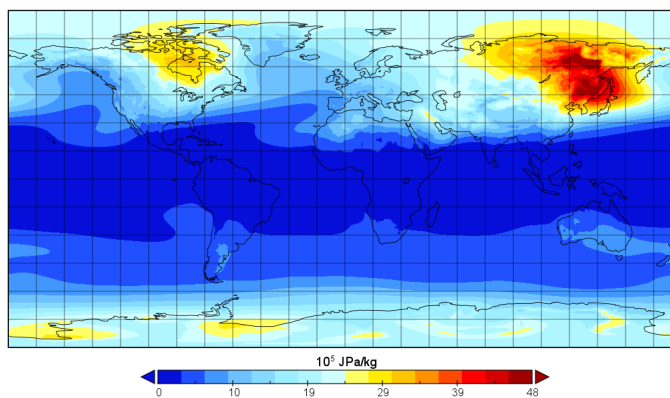
EEPE

Eddy energia mota bakoitza bere aldetik aztertu genezake, baina aztertutako ia lan guztietan iraunkorraren eta iragankorraren batura soilik erakusten denez, hemen ere hala egingo da.

Aurrekoan ez bezala, EEPE longitudearen menpekoa ere bada. 3 dimentsioak ongi adierazteko, beraz, latitude eta presioaren menpeko zeharkako sekzioa (3.3 irudia), eta latitudearen eta longitudearen menpeko banaketa (3.4 irudia) erakutsiko dira. 3.3 irudian latitude bakoitzaren batez besteko zonala dago eginda; 3.4 irudian, aldiz, presio guztien ekarpena batu da. Azken finean, zer gertatzen den jakiteko, balio zehatzak jakitea baino garrantzitsuagoa da emaitzen banaketak aztertzea.



3.3. irudia. EEPEren batez besteko banaketa latitudearen eta presioaren funtzioan, 1.metodoa erabiliz.



3.4. irudia. EEPEren batez besteko banaketa latitudearen eta longitudearen funtzioan, 1.metodoa erabiliz.

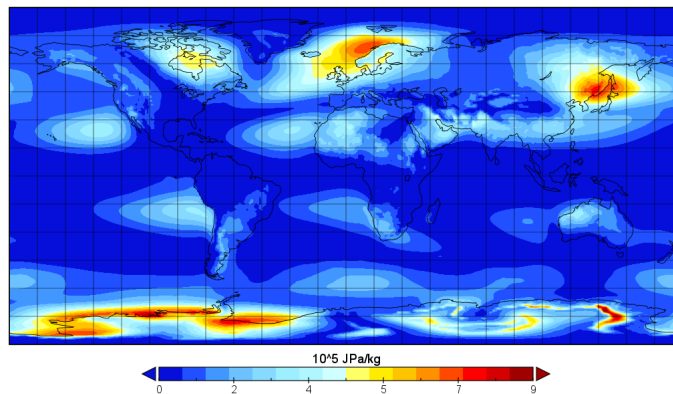
EEPE iraunkorraren balioa handia da puntu bateko tenperatura bere latitudeko batez besteko tenperaturatik asko aldentzen denean. EEPE iragankorrarena, aldiz, handia da tenperatura puntu horretan denboran eginiko batez bestekotik asko aldentzen denean. 3.1 taulako balioei erreparatuz, bigarrenengoarena askoz handiagoa dela ikusi daiteke, beraz, kasu honetan, denborarekiko bariantzak ekarpen handiagoa dauka bariantza espazialak baino; hori bai, autatutako denboraren batez bestekoez zeresan handia dute horretan

[†]Banaketak 1. metodoarekin erakutsiko dira eta denbora-serieak 2. metodoarekin.

(hemen urtekakoak). Ondorioz, 3.3 eta 3.4 irudietan ikusi daitezkeen ekarpen nagusiak EEPE iragankorrarenak dira,

Denboran tenperaturaren aldaketa nabariena poloetatik gertu daudela ikusten da 3.3. irudian. Hego poloko estratosferan eta ipar poloko gainazalean, hain zuzen ere. Presio maila guztien batura egitean, ordea, nabaria da (3.4 irudia) EEPEren balioa ipar hemisferioan dela handiena, 3.1 taulan ikusi daitekeen bezala. Bertako gainazalaren inhomogeneotasunak tenperaturaren bariantzak handiagoak izatea bultzatzen du, eta, ondorioz, *eddy* indartsuagoak azaleratzen dira. Maximoak Ipar Amerikako eta Asiako ekialdeetako kostaldean antzeman daitezke IHn, HHn, aldiz, Antartikaren kostaldean.

EPEE iragankorragatik apur bat ezkutuan geratu denez, 3.5 irudian iraunkorraren banaketa espaziala ageri da, eta tenperaturaren batez besteko zonaletik gehiena aldentzen diren eremuak kostaldean daudela antzeman daiteke. Baita mendikate handien inguruan ere.



3.5. irudia. EPEE iraunkorra latitudearen eta longitudearen funtzioan, 1.metodoa erabiliz.

Eddy energietan parte hartze handiena duten fenomenoak ekaitzak eta zarrastada korranteak[‡] dira eta beren intentsitateek eta maiztasunek *eddy*-en balioa alda dezakete. 3.4 irudiko IHko maximoa zarrastada korrantearen bariantza handitik eratorria izan daiteke, esaterako; eta 3.5 irudiko balioek, aldiz, ekaitzen sorkuntzarekin lotura izan dezakete, itsaso-lur tenperatura kontraste handiak dauden lekutan sortzen baitira. Lekuan lekuko ezohiko fenomenoek ere (lehorteek esaterako) eragin dezakete EEPE energietan.

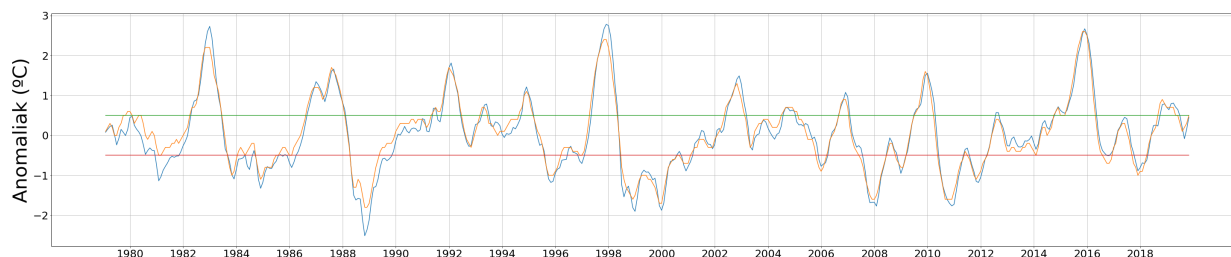
3.3 *El Niño*

Denbora-analisiarekin hasi baino lehen *El Niño* prozesuarentzat lortzen dena aztertuko da. Denbora-analisia egiterakoan interesgarria izan daiteke denbora serietik ENSO zikloak kentzea emaitzen joerak hobeto aztertzeko; azken finean, ENSO zikloek, urtaroe

[‡]*Jet stream.*

bezalaxe, interesatzen ez diren aldaketak eragiten baitituzte.

Metodologian aipatutako prozedura jarraiki, *El Niño 3.4* indizeak finkatutako eremuan itsas-gainazalaren tenperatura anomaliak ondorengo itxura dute (3 hilabeteko *moving average* erabiliz):



3.6. irudia. SST indizeak. Urdinez ERA5 datuekin idazleak kalkulaturakoak eta laranja datu ofizialak (ERSST [9]). Lerro horizontalek *EL Niño* edo *La Niña* urteak finkatzeko muga zehazten dute. Datutegi ezberdinekin lortutako emaitzak konparatuz, ez bada asko ere, denboran geroz eta atzerago joan, biak elkarrengandik orduan eta urrunago daudela ikusi daiteke. Erreanaliseiek sortutako ezberdintasunegatik izan daiteke hori.

Esan denagatik, garai bat *El Niño*ri dagokio bost hilabetez edo gehiagoz jarraian grafikoa lerro berdearen gainetik[§] baldin badago. 3.6 irudia aztertuz, baldintza hori ondorengo urteetan betetzen da (gutxi gorabehera): 1982-83, 1986-88, 1991-92, 1994-95, 1997-98, 2002-03, 2004-05, 2006-07, 2009-10, 2014-16, 2018-19.

Nabarmenenak, ordea, 1982-83, 1997-98 eta 2015-16 urteetakoak dira, 1987-88 eta 1991-92 ondorengoak izanik eta garai horietako mundu mailako fenomenoari begira hasiz, berehala ikusi daiteke *El Niño* prozesuak duen eragin globala. Lan honetan *El Niño* garaitzat aipatutako azken horiek soilik hartuko dira, gogorrenak.

SST anomalien eta energia potentzial eskuragarriaren arteko erlazioak aztertuz jarraituko da eta metodologian aipatutako prozedura segiko da horretarako.

EPEZ eta EPEE balioen denborazko serieei joera lineala, ziklo errepikatuak eta batez besteko balioak kendu zaizkie anomaliak aztertzeke helburuarekin, eta helburua anomalia horien eta SST anomalien artean erlaziorik dagoen edo ez aztertzea izango da. SST anomaliari ere denboran zehar duten joera kenduko zaie[¶], izan ere, klima aldaketak tenperaturaren igoera dakar bai itsasoan bai eguratsean, eta igoera amankomun horiek korrelazioen balioak puztu ditzakete. Ondorengo denborazko-serieak daude:

[§]*La Niña*, aldiz, lerro gorritik behera

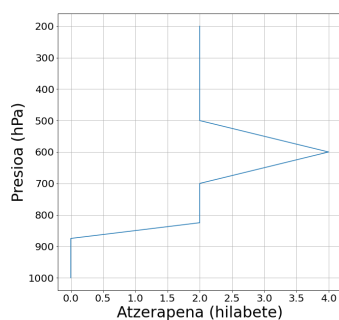
[¶]3.7 irudiko SST anomaliari ez zaie joera kendu denboran zeharreko maximoak ondo ikusteko.



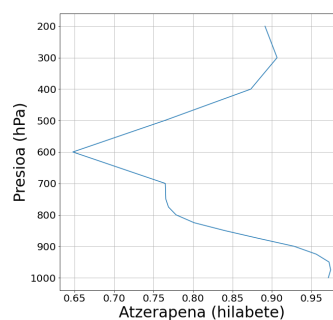
3.7. irudia. Goian SST anomaliak, erdian EPEZ anomaliak eta behean EEPE anomaliak. Guztiei urtaroko zikloak ezabatu zaizkie eta baita batez besteko balioak kendu ere. EPEZ eta EEPE grafikoek joera ere kenduta dute. Lerro berde bertikalek *El Niño* indartsuenei dagozkien garaiak finkatzen dituzte, inguru horietan energien joera errazago aztertzeko.

3.7 irudia aztertuz ikusi daiteke SST anomaliak maximo erlatiboa duenean EPEZek ere maximo erlatiboa duela inguru horretan. EEPEren joera aztertzea, ordea, ez da hain berehalakoa. Dena dela, korrelazioak badaudela ikusi daiteke eta hori izango da aztertuko dena. Korrelazio gurutzatua kalkulatuz bi funtzioen joera zenbateraino dagoen erlazionatua jakin ahal izango da, eta, emaitza onena lortzeko, funtzio bat bestearekiko zenbat desplazatu behar den kontuan hartuko da, hau da, atzerapena kontuan hartuko da.

Aurreko ataletan garbi geratu da tenperaturak nola finkatzen dituen EPEZ eta EEPE. Bada, SST anomalien eta energien arteko erlazioa (korrelazioa) aztertu baino lehen, SST anomalien eta tenperaturaren artekoa aztertuko da, hortik energien portaeraren ideia bat egin baitaiteke. *El Niño 3.4* eremuko itsasoaren tenperaturaren anomalien^{||} eta eremu horretako atmosferako tenperaturen arteko erlazioa behatuko da.



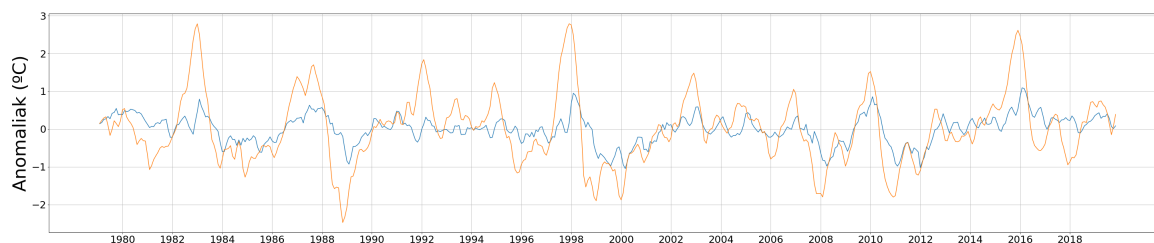
3.8. irudia. *El Niño 3.4* eremuko eguratsaren tenperaturaren anomalien eta itsasoaren tenperaturaren anomalien artean korrelazio maximoa lortzeko atzerapenak.



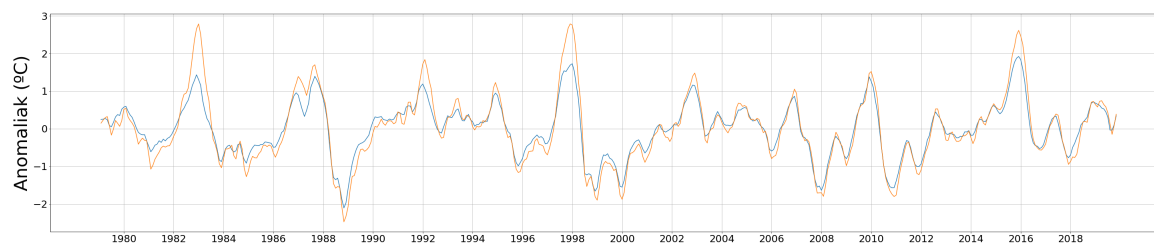
3.9. irudia. 3.8 irudiko atzerapenentzat korrelazio koefizienteak. Irudikoak presio bakoitzerako lor daitezkeen korrelazio maximoak dira, 3.8 irudiko atzerapenekin lortuak.

^{||}SST anomalien.

Eta korrelazioen eta atzerapenen zeresana apur bat hobeto ikusteko, ideia bat egiteko, 700 hPa-etako eta 1000 hPa-etako tenperaturaren anomaliak *SST* anomaliekin batera irudikatuko dira.



3.10. irudia. Urdinez 700 hPa-etako tenperaturaren anomaliak eta laranjaz *SST* anomaliak. Atzerapena 2 hilabetekoa da, korrelazio maximoa 0,76-koa eta p-balioa ~ 0 .

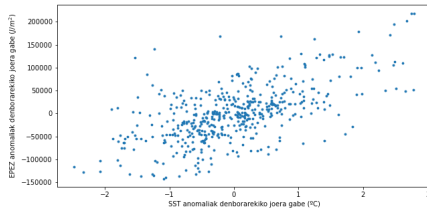


3.11. irudia. Urdinez 1000 hPa-etan tenperaturaren anomaliak eta laranjaz *SST* anomaliak. Atzerapena 0 hilabetekoa da, korrelazio maximoa 0,97-koa eta p-balioa ~ 0 .

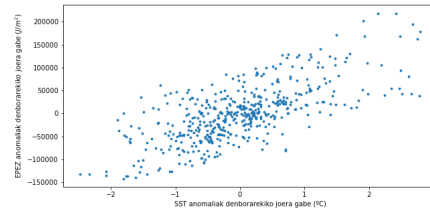
Irudiotan ongi ikusi daiteke itsasoko tenperaturaren eta atmosferakoaren anomalien arteko erlazioa. Itsas mailatik gertu atzerapenik gabeko erlazioa dago bien artean, eta korrelazio koefizientearen balio handiak bi horien artean zuzeneko erlazioa dagoela esaten du. Presioaren balioa jaitsi ahala korrelazio koefizientearen balioak ere hala egiten du**, baina, hala ere, balioak nahiko handiak direnez, ezin daiteke uka itsasoko tenperaturaren aldaketek eguratsean aldaketak eragiten dituztela, hainbat hilabeteko atzerapenarekin bada ere. Eguratseko tenperaturaren anomaliak halako portaera baldin badute *SST* anomaliakiko, horrek esan nahi du energien balioek ere izan beharko dutela menpekotasunen bat.

Hurrengo pausua *SST* anomalien eta energien balioen artean Pearson-en korrelazioa aplikatzea izango da. Horretarako lehenik sakabanaketa grafikoak aztertuko dira.

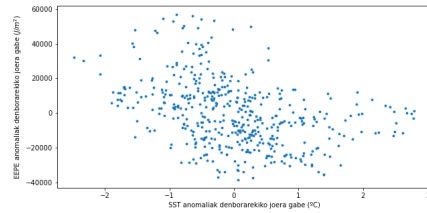
**Azaldu diren presioetatik behera lortutako emaitzak ez zirenez esanguratsuak, ez dira azaldu. Bertako tenperaturetan *SST* anomaliak ez diren beste faktore batzuk garrantzi gehiago izan dezakete, baina hori ez da hemen aztertuko.



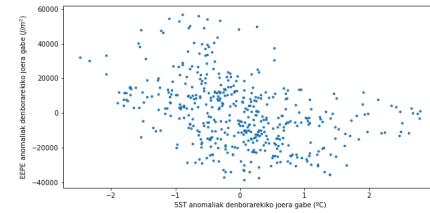
3.12. irudia. 0 hilabeteko atzerapenarekin sakabanatze grafikoa SST anomalien eta EPEZ anomalien artean (denbora joerak ezabatuta).



3.13. irudia. 3 hilabeteko atzerapenarekin sakabanatze grafikoa SST anomalien eta EPEZ anomalien artean (denbora joerak ezabatuta).



3.14. irudia. 0 hilabeteko atzerapenarekin sakabanatze grafikoa SST anomalien eta EEPE anomalien artean (denbora joerak ezabatuta).



3.15. irudia. Hilabete bateko atzerapenarekin sakabanatze grafikoa SST anomalien eta EEPE anomalien artean (denbora joerak ezabatuta).

EPEZEN bi grafikoetan SST anomalien eta EPEZ anomalien artean nolabaiteko erlazio lineala dagoela antzeman daiteke (3 hilabeteko atzerapenekoan nabarmenagoa da hori). EEPEren kasuan, aldiz, ez da hain berehalakoa linealtasun hori. Lan gehienek Pearson-en korrelazioa erabiltzen dutenez halako analisietarako, hemen ere hala egingo da, baina amaieran (4. atalean) hitz egingo da gehiago metodo honen zuzentasunaz. Metodo horrekin lortzen diren korrelazioaren balioak ondorengoak dira:

Atzerapena	Korrelazioa
0	0,619
3	0,701
4	0,693
2	0,691

3.2. Taula: EPEZEN denborazko seriearen atzerapen batzuk eta beren korrelazioak. 0 atzerapena ez beste guztiak korrelazio koefizienterik handienak ematen dituztenak dira.

Atzerapena	Korrelazioa
0	-0,383
1	-0,379
2	-0,373
3	-0,364

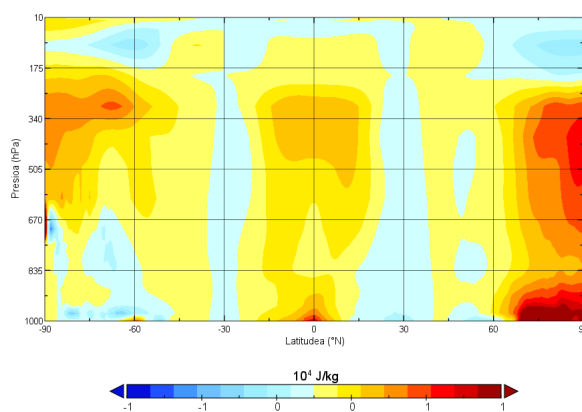
3.3. Taula: EEPEren denborazko seriearen atzerapen batzuk eta beren korrelazioak. Korrelazio koefizienterik handienak ematen dituzten atzerapenak dira.

EPEZentzat ikusi daiteke SST anomaliak gora egiten dutenean EPEZEN balioek ere hala egiten dutela, EEPEren kasuan, aldiz, aurkako joera dute bi aldagaiek. EPEZentzat lortutako korrelazioaren balioak EEPErentzat lortutakoak baino handiagoak direnez, lehenengoak SST anomaliakiko menpekotasun handiagoa duela esan daiteke. EPEZ kasuan, korrelazioak maximoa 3 hilabeteko atzerapenarekin ematen du, beraz, EPEZ energiak

denbora behar du itsasoko tenperaturaren aldaketen aurrean erreakzionatzeko. *Eddy* energien kasuan ez dago atzerapenik korrelazio maximoarentzat. 3.13 irudian ikusi daitekeen bezala joera nabariena EPEZek daukanez 3 hilabeteko atzerapenarekin, horri helduko zaio ondorengo azterketetarako.

Oraingoz *El Niño* garaia dagozkion urteak finkatu dira, *El Niño 3.4* eremuan itsasoko eta eguratseko tenperaturen anomaliak erlazionatu dira eta, behin hori jakinda, energia potentzial eskuragarriak itsasoko tenperatura horrekiko nola aldatzen diren ikusi da. Hurrengo helburua *El Niño* urteetako energia eskuragarriak garai arruntetako balioetatik nola aldentzen diren jakitea da.

3.7 iruditik ez da zaila ondorioztatzea *El Niño* urteetan zehar EPEZEN balioak gorakada nabarmena jasaten duela. Korrelazioarentzat lortutako balio handiek ere hala adierazten dute, batak gora egiten duenean besteak ere gora egiten duela. Sarreran aipatutako bost *El Niño* urte indartsu horiek hartu eta bakoitzean dagoen *SST* anomalia indize altuenaren hilabetea urtearen zentruzat hartzen bada (*El Niño* “urtea” zehatzago definituz), *El Niño* urteetan EPEZek $\sim 2.08\%$ -ko igoera duela lortu daiteke^{††}. Urtea definitzeko metodo hori erabiltzean atzerapenak mugen barruan daudenez (atzerapen maximoa 4 hilabetekoa zen), energien maximo erlatiboak nahiko ongi hartzen dira kontuan. Hori bai, badaude urte bat baino gehiago irauten duten *El Niño* zikloak, beraz, metodoa ez da itxu-itxu jarraitzekoa. Energiaren aldaketaren ideia bat egiteko besterik ez da.



3.16. irudia. *El Niño* garaiko EPEZEN eta garai arruntetako EPEZEN batez besteko banaketaren arteko diferentzia (1. metodoa erabiliz).

Irudia behatuz *El Niño* garaiko berotze nabariak ipar poloko troposferan, ekuatorean gainazaletik gertu eta hego poloan lurrazaletik gora daudela ikusi daiteke. Ekuatoreko lurgaineko berotzeak arrazoi sinplea dauka atzetik, normalean bertako tenperaturak azalerako batez bestekoak baino handiagoak dira eta *El Niño* garaian diferentzia

^{††}EEPEk $\sim 1.18\%$ -ko jaitsiera du, baina gauzak azkartzeko ez da hemen aztertuko.

hori handiagoa dela ikusi daiteke Ozeano Bareko tenperaturen igotzeak bertako eguratsuko tenperaturen igotzea dakarrelako. Ipar poloan bertako tenperatura azalerako batez bestekotik are gehiago aldentzen dela ikusi daiteke *El Niño* garaian. Ozeano Barearen berotzeak atmosferako batez besteko tenperaturen igotzea ekar dezake tropikoetako tenperaturen igoeragatik, horrela poloetako tenperaturaren bariantzaren balioa handiagotuz eta aldi berean EPEZEN balioa igoz. Berdina gertatzen da hego poloan, baina kantitate txikiagoan.

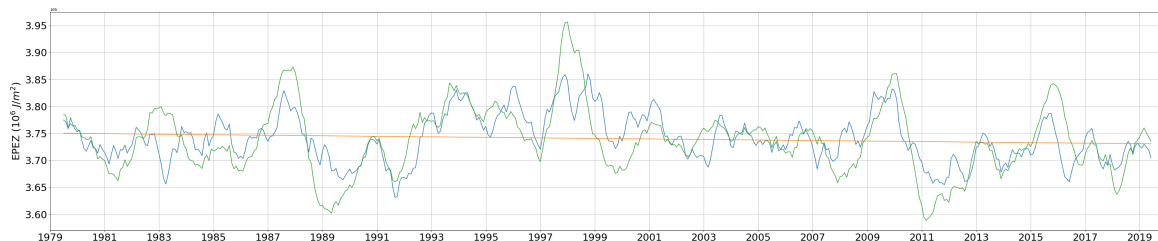
Beste eremu guztietako hozte eta berotzeak ez direnez esanguratsuak, honekin amaitutzat emango da *El Niño*-ren analisisa.

3.4 Denbora-analisisa

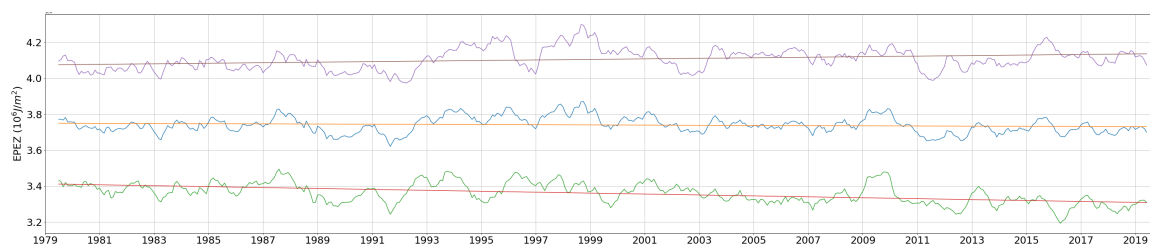
Atmosferaren dinamika eta klima aldaketa aztertzeke erreminta bikaina izan daiteke Lorenz-ek definitutako energia potentzial eskuragarria. Oraingoan, energien balioen aldaketak aztertuko dira 1979 eta 2020 bitartean.

Serie baten denbora analisisian ENSO zikloak (*El Niño* eta *La Niña*) zarata nabarmena dira, beraz, iada aurreko azpiataletik ziklo horien ezagutza orokor bat izanik, energien balioen denbora serieetatik ziklo horiek kenduko dira. Pearson-en korrelazio faktorea erabiltzean ikusi da SST anomalien eta EPEZ balioen artean nolabaiteko erlazio lineala dagoela, beraz, metodologian aipatutakoa aplikatuko da ziklo horiek kentzeko. EEPEk erakusten zuen erlazio lineala ez zen hain nabarmena baina metodo berdina aplikatuko da energia horien kasuan ere.

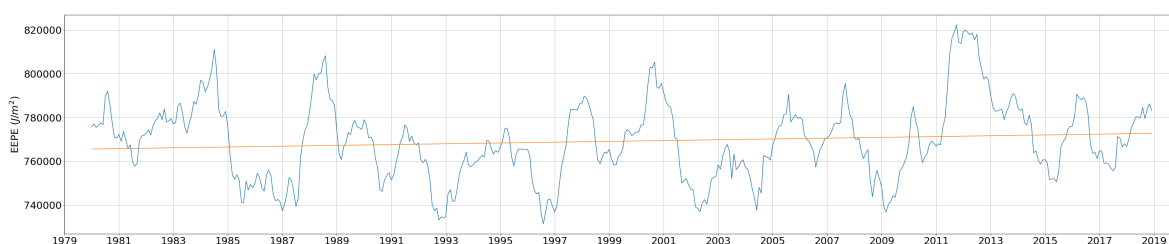
Maiztasun altuko zikloak eta ENSO zikloak kenduta lortutako emaitza guztiak azalduko dira jarraian eta ondoren beren portaerak aztertuko dira:



3.17. irudia. EPEZ azalera unitateko balioak 1979-2019 tartean. Urdinez aipatutako zikloak kendutako EPEZ seriea, berdez ENSO zikloak kendu gabekoa eta gorritz funtzio urdinarentzako erregresio lineala.



3.18. irudia. EPEZen balioak IHn berdez, HHn morez eta urdinez 3.17ko funtzio bera. Kurba bakoitzaren gaineko lerroak kurba horien erregresio linealak dira.



3.19. irudia. EEPE azalera unitateko balioak 1979-2019 tartean. Urdinez aipatutako zikloak kendutako EEPE seriea eta gorriz erregresio lineala.

EPEZ aztertzeko, 3.17 eta 3.18 behatuko dira lehendabizi. Aurrenekoan EPEZ-ek orotara joera negatiboa duela ikusi daiteke, urtero 490 J/m^2 -ko jaitsiera izanik. Erregresio linealean, hipotesi nulutzat ez-linealtasuna hartuz, lortutako p-balioa 0,005-ekoa denez hipotesi nulu hori baztertu eta erlazio lineala onartzea egokia dela esan daiteke. Bigarren irudiari erreparaturik, joera beharokorraren errudun nagusia IHn dagoela esan daiteke, eta horren zergatia ipar poloko tenperaturen igoeran egon daiteke. Aurretik ikusi denagatik, ezaguna da poloetan EPEZek balio handiak hartzen dituela bertako tenperaturak asko aldentzen direlako azalerako batez bestekotik, beste lekuetan baino askoz tenperatura baxuagoak daudelako, hain zuzen ere. Ipar poloaren berotzeagatik tenperaturen bariantza geroz eta txikiagoa da eta, ondorioz, EPEZen balioa jaitsi egiten da. Hori izan daiteke beharakada horren arrazoi nagusia. “Ipar poloaren berotzea” aipatzean urteko sasoi guztien batez besteko tenperaturen joera esan nahi da, izan ere, udarako tenperaturetan zentratuz, tenperaturak apurka jaisten doazela ikusi daiteke. Udaran izotzaren urtzearekin lotutako bero-zor handia dela eta, eguzkitik datorren energiaren frakzio txiki bat soilik dago eskuragarri atmosferako tenperaturen igoerarako; geroz eta izotz gehiago urtu, orduan eta txikiagoa izango da atmosferako tenperaturen igoera. Hala ere, beste sasoietako tenperaturen igoera udarako jaitsiera horri gailentzen zaio.

Hego hemisferioko EPEZen igoeraren eragile nagusia Antartikaren gaineko Ozono geruzaren zuloa izan daiteke. Azken urteotan bere tamaina apur bat txikitu arren, 1979koarekin alderatuta egungoa handiagoa da, eta horrek eragin nabariak izan ditzake atmosferako tenperaturan (eta, beraz, energia potentzial eskuragarrian). Ozonoak eguzkitik datorren erradiazio ultramorea xurgatzeaz gain lurretik espazioranzko erradiazio infragorria ere xurgatzen duenez, barne energia irabazi eta eremuko tenperatura igoarazten du. 1979tik

hona ozono geruzaren zuloak gora egin duenez, geroz eta ozono gutxiago dago Antartikaren gainean eta horrek aipatutako berotze prozesu hori murriztea dakar. Ondorioz, hego polo gaineko tenperaturak (estratosferakoak, ozono geruza bertan baitago) geroz eta hotzagoak dira eta EPEZ definitzen duten bariantzak geroz eta handiagoak.

Aipatzearren, 3.17 irudian ENSO ziklorik gabeko eta ENSO zikloa duen serieen arteko aldea ere ikusi daiteke, eta begi bistakoa da ziklo horiek kentzeak EPEZen maximoak txikiagotzen dituela, Ozeano Bareko itsasoaren berotzeak induzitutako maximo horiek ezabatzen baitira.

EEPEri dagokionez (3.19) joera lineala gorakorra dela ikusi daiteke, urtean $183 J/m^2$ -ko igoerarekin eta 0,012-ko p-balioarekin. Joera lineala kontsideratzea, beraz, egokia da (0,05-eko esangura maila baino txikiagoa delako p-balioa). *Eddy* energiari ekarpen handienak egiten dizkienak zarrastada korranteak^{‡‡} eta ekaitzak dira. Lehenengoak mendebaldetik ekialderanzko haize indartsuak dira, poloetako eta tropikoetako tropopausaren artetik joaten direlarik; bigarrenak, aldiz, itsaso-lur tenperatura kontrasteak dauden guneetan sortu (3.5 irudia) eta ozeanoetan zehar joan ostean lurrarekiko marruskadurak sunsitutako zikloiak dira, ekialdetik mendebalderanzko mugimenduarekin. Bada, 1979 eta 2020 bitartean bi fenomeno horien maiztasunaren eta indarraren igoera izan daiteke EEPEren gorakadaren arrazoietakoa bat [12], EEPE iragankorraren balioa handituz. Esaterako, mundu mailako tenperaturen igoerak zikloi tropikalen intentsitatearen igoera ekarri du eta hori zuzenean lotu daiteke EEPEren igoerarekin.

^{‡‡}*Jet stream.*

4. Kapituluia

Arazoak eta hobekuntzak

Konparaketarako lanak

Hasteko, konparaketarako lan egoki bat aukeratzea ez da erraza izan. Izan ere, lan gehienek eguneroko datuak erabiltzen dituzte (lan honetan hilabeterokoak erabili dira), eta, batez bestekoak urteka eginda ere (lan honetan bezala) *eddy* energiarentzat emaitza oso desberdinak lortu daitezke. Lan ezberdinek elkarren artean ere ezberdintasun nabariak dituzte.

Topografia

Bestalde, topografiaren kontua ere badago. Lan askok ez dute aipatu ere egiten kontutan hartu izana, eta ez da erraza izan emaitzen diferentzia horri zegokion edo ez jakitea. Aipatzen dutenek, Oort-ek 1983an definitutako latitudearen araberako pisu batzuk erabiltzen dituztela diote [6] eta, pisu horiek aztertuz, hemen erabilitako betaren batez besteko zonalaren oso antzekoak direla ikusi daiteke*. Hemen erabilitako 2. metodoan betak biderkadura faktore baten lana egin du, dP presio banaketak definitzean lurrazpiko balioak zerotzen zituena. Oort-en biderkadura faktorea bezala, hain zuzen ere. Alde horretatik, beraz, konparaketarako erabilitako emaitzek ez lukete asko aldentu behar hemen 2. metodoarekin lortutakoetatik.

Erregresio lineala

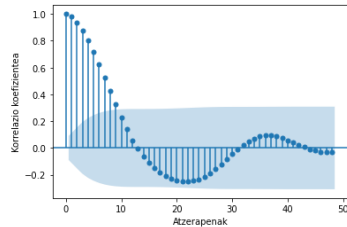
Denboran zeharreko joerak lortzean karratu txikienen erregresioa erabili izanak ere izan ditzake bere arazoak. Erregresio lineala egiteko menpeko aldagaiaren (y) eta aldagai askearen (t) artean erlazio lineala egon behar da, t bakoitzerako hondarren[†] bariantza konstantea izan behar da, hondarrek independenteak izan behar dute (autokorrelaziorik gabeak) eta hondarrek banaketa normal bat jarraitu behar dute.

Energien denbora-serieetan joera lineala dagoela ikusi da, beraz, aurreneko baldintza be-

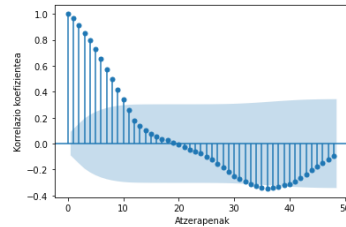
*Oort-en pisuak -80°N - 80°N tartean daude definituta, garai hartako datu faltagatik.

[†]Funtzioari erregresio lineala kentzean geratzen dena.

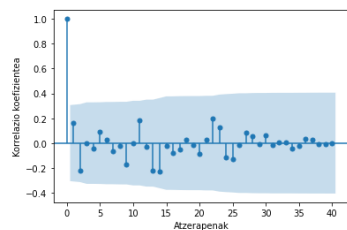
tetzen dela esan daiteke. Hondarren bariantzak begiratzuz, tarte jakin batzuetan asko aldentzen diren puntuak egon arren[‡], denboran zehar nahiko uniforme dela esan daiteke; bigarren baldintza ere betetzen da, beraz. Hondarren independentzian, ordea, badago arazo bat. *Moving average* delakoa erabili izanak hurbileko hilabeteen arteko menpekotasuna sortzen duenez, denbora serieek autokorrelazioa dute. Esaterako, *moving average* erabili beharrean urtekako batez besteko arrunta erabiliz (eta denbora tarterako 41 datu soilik lortuz) ez dago halako arazorik.



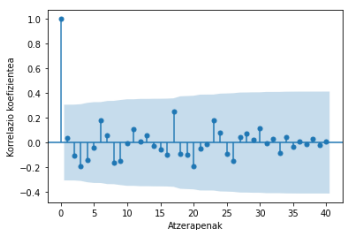
4.1. irudia. EPEZ balioen autokorrelazioa *moving average* erabiltzen den denbora seriean.



4.2. irudia. EEPE balioen autokorrelazioa *moving average* erabiltzen den denbora seriean.



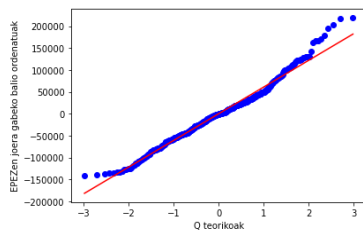
4.3. irudia. EPEZ balioen autokorrelazioa urtekako batez bestekoak erabiltzen diren denbora seriean.



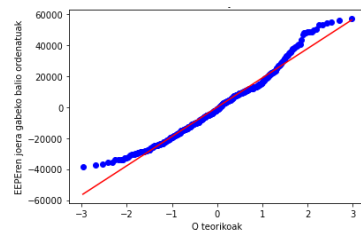
4.4. irudia. EEPE balioen autokorrelazioa urtekako batez bestekoak erabiltzen diren denbora seriean.

Eremu urdinetik at dagoen puntu orok korrelazioa dagoela adierazten du, eta ikusi daiteke *moving average* erabiltzean autokorrelazioa dagoela. Hirugarren baldintza, beraz, ez da betetzen kasu horietarako (4.1 eta 4.2 irudiak), bai, ordea, urtekako batez bestekoak erabiltzerakoan (4.3 eta 4.4).

Azkenik, aldagaien normaltasuna aztertzeko Q-Q grafikoa erabiliko da. Ondorengo emaitzak lortu dira:

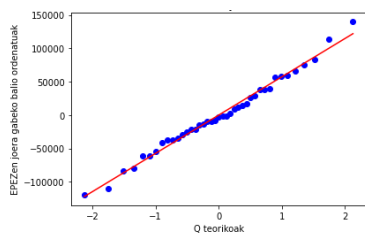


4.5. irudia. EPEZ balioen autokorrelazioa *moving average* erabiltzen den denbora seriean.

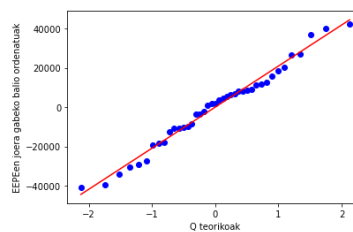


4.6. irudia. EEPE balioen autokorrelazioa *moving average* erabiltzen den denbora seriean.

[‡]Puntu horiek kalte egiten diote erregresio linealari.



4.7. irudia. EPEZ balioen autokorrelazioa urtekako batez bestekoak erabiltzen diren denbora seriean.



4.8. irudia. EEPE balioen autokorrelazioa urtekako batez bestekoak erabiltzen diren denbora seriean.

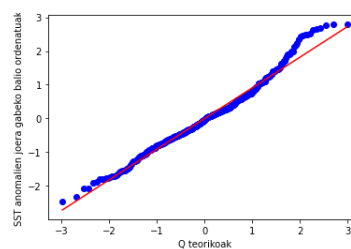
Bi denbora serieetarako lortutako emaitzak nahiko ongi egokitzen dira banaketa normalaren lerro zuzenera, beraz, ziurtasun osoz ez bada ere, energien balioek banaketa normala jarraitzen dutela esan daiteke.

Itxuraz, normaltasun hori hobeto betetzen da urtekako batez bestekoen kasuan, eta batez besteko horiekin autokorrelazioen arazorik ere ez dagoenez, bera izan daiteke egokiena erregresio lineala egiteko. Datu kopuruaren ordainetan erregresioaren zuzentasuna lortzen da. Hori bai, ENSO zikloak kentzeko prozesua ere aldatu egingo litzateke datu kopuru ezberdintasunagatik. Aurreko kasuetan normaltasun eza onartuko balitz, hoberena erregresio linealaren ordez Mann-Kendall testa erabiltzea litzateke, aldagaien banaketak axola barik seriearen monotoneitatea aztertuz eta Sen-en malda bidez joeraren magnitudea kalkulatu.

Pearson-en korrelazioa

SST anomalien eta energien arteko korrelazioa kalkulatzeko Pearson-en metodoa erabiltzeak ere baditu bere gorabeherak. Lan askotan metodo hori erabiltzen denez ([11] esaterako), hemen ere hala egin da. Hori bai, Pearson-en korrelazioa erabiltzeko ere kondizio batzuk bete behar dira. Pearson-en korrelazioaren eta erregresio linealaren artean lotura estua dago, eta ezinbestekoa da aldagaiek erregresio linealarentzat aipatutako baldintzak betetzea. Normaltasunari dagokionez ikusteko falta den bakarra SST anomalien da (4.9 irudia).

Hori ere, besteen gisa, normaltzat kontsideratuko da, beraz, normaltasun aldetik arauak betetzen dira. Aldagai hauekin lortutako sakabanaketa grafikoak 3.12-3.15 irudietan daude, eta Pearson-en baldintzak betetzen diren ala ez esatea ez da hain erraza. 3.12 eta 3.13 irudietan joera lineala ikusi daiteke, beste bietan, ordea, ez da hain nabararria. *Moving average*-kin lortutako emaitzak dira guztiak, beraz, autokorrelazioa ere hor egongo da. Bariantza konstanterik ere ez da nabari (3.13an ez bada) eta sakabanatutako puntu ugari ere badaude. Pearson-en korrelazioa, beraz, baliteke oso zuzena ez izatea.



4.9. irudia. Joerarik gabeko SST anomalien Q-Q grafikoa.

Soluzio bezala Spearman korrelazioa erabili daiteke. Metodo honetarako ez du axola aldagaien banaketak, eta Pearson-en metodoak aldagaien linealtasuna eskatzen duen bezala, honek monotoneitatea eskatzen du. Aldagaiak Pearson-en baldintzak nola betetzen zituzten ikusita, baliteke honek emaitza zuzenagoak ematea, printzipioz kondizio malguagoak eskaintzen baititu. Spearman-en korrelazio koefizienteak aldagai batek bestearikiko duen joera gorakorra edo beherakorra den esango du, linealtasuna alde batera utziz. Honakoak dira metodo hau erabiliz lortutako balioak energia eta SST anomaliarentzat (joera gabe):

Atzerapena	Korrelazioa
3	0,665
4	0,661
2	0,654
0	0,580

4.1. Taula: EPEZ anomalien korrelazioak SST anomaliarekin, biak joera gabe eta atzerapen jakin batzuetarako. Spearmanen korrelazioa erabili da.

Atzerapena	Korrelazioa
0	-0,432
1	-0,427
2	-0,422
3	-0,410

4.2. Taula: EEPE anomalien korrelazioak SST anomaliarekin, biak joera gabe eta atzerapen jakin batzuetarako. Spearmanen korrelazioa erabili da.

Pearson-en metodoaren antzera, korrelazio koefizientea 1etik edo -1etik geroz eta gertuago egon, orduan eta nabariagoa da aldagaien arteko erlazio monotonoa.

Balio guztiak dira estatistikoki esanguratsuak. Korrelazioen balioak apur bat aldatzen dira, baina ez dago beste munduko aldatetarik beren esanahietan. SST anomaliak igotzearekin EPEZen balioak igo eta EEPErenak jaitsi egiten dira, eta EPEZek SST anomalia horiekiko erlazio handiagoa du EEPEk baino. Lehen gauza bera ondorioztatu zitezkeen, eta, gainera, korrelazio maximoko atzerapenak berdina izaten jarraitzen dute.

Patroi klimatologikoak

Azkenik, eragin handienetarikoa beraiena denez, testuan zehar ENSO zikloen arabera-ko energien portaera soilik aztertu da. Horrek ez du esan nahi, ordea, energien balioetan eragiten duen ziklo bakarra hori denik. Espazio eta denbora-eskala handietan aldatzen diren hainbat patroi daude, eta horien gorabeherak mundu mailako eta eskualdeko tenperatura aldakuntzetan eragina izan dezakete. Horien artean daude, besteak beste, NAM (*Northern Annular Mode*), SAM (*Southern Annular Mode*), NAO (*North Atlantic Oscillation*), PNA (*Pacific North American pattern*), AMO (*Atlantic Multidecadal Oscillation*) eta PDO (*Pacific Decadal Oscillation*) indizeak. Sumendi aktiboen portaerak ere izan dezake eragin nabaria energietan. Patroi horien guztien eragina kontutan izango balitz, emaitza zuzenagoak lortuko lirake.

5. Kapituluia

Ondorioak

Lan honetan, atmosferako temperaturaren banaketatik abiatuz, eguratseko energia potentzial eskuragarriaren banaketa espazialak, denbora-serieak eta *El Niño* garaiko portaerak aztertu dira.

Antartikako temperatura hotzengatik EPEZ hegoaldean dela handiena ikusi da, ipar poloa ere balio esanguratsuak izanik. EEPE energiek, aldiz, ipar hemisferioan balio handiagoa dutela behatu da bertako topografiaren heterogeneotasunak eraginda, eta energia mota horri gehien eragiten dietenak zarrastada korronteak eta ekaitzak direla ondorioztatu da. EEPEri itsaso-lur temperatura kontrasteak dauden lekuko fenomenoek asko eragiten dietela behatu da.

Ozeano Bareko itsasoaren temperaturaren aldaketek gaineko eguratseko temperaturan zuzeneko eragina dutela ikusi da, eta horregatik energia potentzial eskuragarriaren balioekin nolabaiteko erlazio lineala duela neurtu ahal izan da. EPEren gehiengoa den EPEZek SST anomaliarikiko 3 hilabeteko atzerapenarekin duen erlazio lineala ikustarazi da eta *El Niño* garaian EPEZen parte aktiboenak indartzen direla erakutsi da, SST anomaliak eragindako ekuatoreko temperaturen igoeraren eragina azpimarratuz.

Behin SST indizeen eta EPEren arteko erlazio lineala erakutsita, ENSO zikloen eragina energien denbora-serieetatik ezabatu da eta denboran aurrera egin ahala EPEZen joera beharokorra eta EEPEren joera gorakorra ikustarazi dira. Lehenengoaren zergatia ipar poloko temperaturen igoeratik dela ondorioztatu da (EPEZen balioa txikiagotuz), eta bigarregokoaren gorakada zarrastada korronte eta ekaitzen maiztasun eta intentsitatearen gorakadaren ondorio izan daitekeela ikusi da.

Energia potentzial eskuragarriaren portaera ezagutzeak atmosferako hainbat prozesuren ezagutzara eramaten du. Hori bai, atmosferako energia zikloaren* ikerketa sakonago baterako, beharrezkoa da energia zinetikoaren eta energia mota ezberdinen xahutze eta sorkuntzaren balioak eta aldaketak aztertzea. Lan honetan egindakoa prozesu horren guztiaren hasierako pausu modura har daiteke.

*Lorenz-en energia zikloaren.

Bibliografia

- [1] LORENZ, E.N. (1955), Available Potential Energy and the Maintenance of the General Circulation. *Tellus*, 7: 157-167. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1955.tb01148.x>
- [2] Lorenz, E. (1967). The nature and theory of the general circulation of the atmosphere.
- [3] OORT, A. H. (1964). ON ESTIMATES OF THE ATMOSPHERIC ENERGY CYCLE, *Monthly Weather Review*, 92(11), 483-493. Retrieved Jun 15, 2021, from https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/92/11/1520-0493_1964_092_0483_oeotae_2_3_co_2.xml
- [4] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2019): ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)., 10.24381/cds.6860a573
- [5] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J-N. (2019): ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)., 10.24381/cds.f17050d7
- [6] Li, L., Ingersoll, A. P., Jiang, X., Feldman, D., and Yung, Y. L. (2007), Lorenz energy cycle of the global atmosphere based on reanalysis datasets, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L16813, doi:10.1029/2007GL029985.
- [7] Kim, YH., Kim, MK. Examination of the global lorenz energy cycle using MERRA and NCEP-reanalysis 2. *Clim Dyn* 40, 1499–1513 (2013). <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1358-4>
- [8] Boer, G. J. (1982). Diagnostic Equations in Isobaric Coordinates, *Monthly Weather Review*, 110(12), 1801-1820. Retrieved Jun 15, 2021, from https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/110/12/1520-0493_1982_110_1801_deiic_2_0_co_2.xml
- [9] Boyin Huang, Peter W. Thorne, Viva F. Banzon, Tim Boyer, Gennady Chepurin, Jay H. Lawrimore, Matthew J. Menne, Thomas M. Smith, Russell S. Vose, and Huai-Min Zhang (2017): NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST), Version 5. [indicate subset used]. NOAA National Centers for Environmental Information. doi:10.7289/V5T72FNM.

- [10] Li, L., Jiang, X., Chahine, M. T., Wang, J., Yung, Y. L. (2011). The Mechanical Energies of the Global Atmosphere in El Niño and La Niña Years, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 68(12), 3072-3078. Retrieved Jun 15, 2021, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/68/12/jas-d-11-072.1.xml>
- [11] Qiyun Ma, Valerio Lembo Christian L.E. Franzke (2021) The Lorenz energy cycle: trends and the impact of modes of climate variability, *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 73:1, 1-15, DOI: 10.1080/16000870.2021.1900033
- [12] Pan, Y., Li, L., Jiang, X. et al. Earth's changing global atmospheric energy cycle in response to climate change. *Nat Commun* 8, 14367 (2017). <https://doi.org/10.1038/ncomms14367>
- [13] Lu, J., Chen, G., Frierson, D. M. W. (2008). Response of the Zonal Mean Atmospheric Circulation to El Niño versus Global Warming, *Journal of Climate*, 21(22), 5835-5851. Retrieved Jun 15, 2021, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/21/22/2008jcli2200.1.xml>
- [14] Emaidza guztiak lortzeko sortutako Python kodea:
<https://github.com/MikelSaras/GrAL.git>