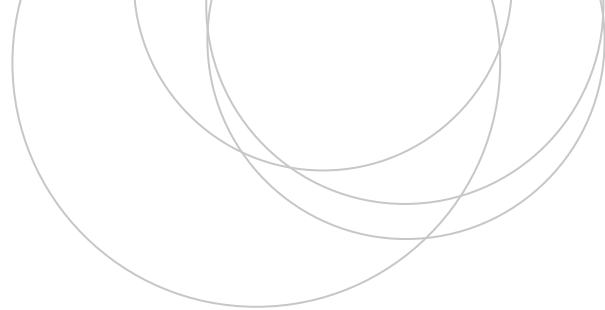




Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

ZIENTZIA
ETA TEKNOLOGIA
FAKULTATEA
FACULTAD
DE CIENCIA
Y TECNOLOGÍA



Gradu Amaierako Lana
Fisikako Gradua

Groenlandiako uraren eta energiaren balantzeak ERA-Interim erreanalisiaren bidez.

Egilea:
Joseba Hernández Bravo
Zuzendaria:
Jon Sáenz Agirre

Laburpena

Oinarrizko bibliografian izotz-geruzen gainean eguratsak sortutako hainbat hazkunde eta txikitze prozesuak deskribatzen dira, besteak beste: bero sor fluxuak (lurrunketa edo sublimazioa), prezipitazioa (euria edota elurra), eguzkiko uhin-luzera laburreko (argi-ikusgai) edo uhin-luzera luzeko (infragorria) energiaren erradiazio fluxuak, hodeitza (uhin-luzera luzeko gainazalak igorritako erradiazioaren kontrolatzailea) edo itsasoko eragina kostaldean, besteak beste. Lan honetan eguratseko eragin zuzenak direnak aztertu ditugu Groenlandiako gainazalean. Horretarako, ERA-Interim Europar ECMWF zentroko datuak erabili ditugu. Datuen sarearen erresoluzio horizontala 80km x 80 km-koa da eta 1979-2018 urte tartean daude eskuragarri. Hortaz, denbora periodo horretako datuak erabiliz 1980-2018 urte periodan zeharreko gainazaleko masa eta energia fluxu netoak kalkulatu ditugu lan honetan. Alde batetik, ur masa galeraren ekarpen handiena urtzea izan dela ondorioztatu dugu. Izan ere, fenomeno honek izandako joera urtez urte handitu da, eta, periodo osoaren lehenengo hamarkadan batezbesteko 482 [Gt/urte]-ko balioa izatetik batezbesteko 583 [Gt/urte] izatera pasatu da azkenen hamarkadetan. Bestaldetik, prezipitazioaren ondorioz izandako ur ekarpen handiek, urtzeagatik izandako masa galerei aurre egin diete. Ondorioz, lurralde osoko gainazaleko masaren irabaziak galerak baino handiagoak izan dira. Hala eta guztiz ere, joera ezegonkorra izan duen gertakari bakarra urtzea izan da eta ondorioz, masa totalaren joera beherakorra dela ikusi dugu.

Gaien Aurkibidea

1	Sarrera eta helburuak	1
1.1	Sarrera	1
1.2	Helburuak	2
2	Oinarri teorikoa	4
2.1	Atmosferaren oinarrizko ekuazioak	4
2.1.1	Jarraitasunaren ekuazioa	4
2.1.2	Ur-lurrunaren ekuazioa	6
2.1.3	Termodinamikaren lehenengo legea	6
2.2	Masa	7
2.2.1	Ur-lurrunaren balantze ekuazioa	7
2.3	Energia	9
2.3.1	Energia balantzearen ekuazioak	10
2.3.2	Bolumenezko integralak	12
3	Datuak	14
4	Emaitzak eta eztabaidak	16
4.1	Masa balantzea	16
4.2	Energiaren balantzea	20
5	Ondorioak	25
	Bibliografia	27

Kapitulua 1

Sarrera eta helburuak

1.1 Sarrera

Aldaketa klimatikoa poloetako urtzea azeleratzen duen fenomeno bat da, faunan, floran eta gizakien biziraupenerako metodo tradizionaletan kalte larriak eraginez [1]. NBE-ren arabera 2050 urterako 1000 milioi pertsona, munduko biztanleriaren zazpirena gutxi gorabehera, kaltetuak izango dira glaziarren desagertzearen eta itsas mailaren igoeraren ondorioz [2].

Poloen urtzeak kaltetutako komunitateen artean, bereziki aipagarriak dira Groenlandiako mendebaldeko *inuitak*. Izatez, herri honek aintzinako bizimodua mantentzen du, ehizan eta arrantzan oinarritutakoa. Bankisaren desagertzeak, beraz, aktibitate hauen gauzatzea zaildu eta inuiten biziraupena arriskuan jartzen du [3].

Poloetako urtzearen beste zoritzarreko ondorio bat animalia espezie askoren desagertzea da, besteak beste, hartz polarrak. Animalia hauek itsas izoztuaz baliatzen dira euren oinarrizko elikagai iturria ehizatzeke: fokak. Hortaz, izotzaren murrizpenak distantzia handiak ibiltzera behartzen ditu, haien gorputzetan desoreka energetiko larriak sorraraziz. Aldaketa hauek animalien ugalketan eragiten dute bereziki, espeziea galzorian jarriz [4].

Iparraldeko hemisferioan existitzen den ur gezadun urtegi handiena Groenlandia da [5]. Zehazki, itsasoa batezbesteko 7.4 m-tan igotzeko ur kantitate adina duela kalkulatu zuten 2017an egindako [6] ikerketan. Azkenengo hamarkadetan tenperatura-hazkunde aipagarriak erregistratu dira lurralde honen inguruan, itsasoan zein atmosferan. Aldaketa hauek ur isurpenaren handipena eta gainazal gaineko lakuen eta *iceberg* gehiagoren sorrera ekarri dute, besteak beste. Izan ere, 90. hamarkadaren hasieran neurturiko masa-galeraren abiadura, 2005-2010 periodoan neurtutakoaren bostena izan zen [7]. Hala ere, urtzearen prozesuak izan duen eboluzioa ez da batere lineala izan. 2013-2018-ko periodoan, adibidez, prezipitazioaren igoeraren eta atmosferaren hoztearen ondorioz, izotz galeraren abiadura modu aipagarrian gutxiagotu zen. Baina zelan neurtzen da guzti hau?

70. hamarkada aurretik, ipar poloko izotzaren hedapen eta kontzentrazioaren ezagutza ez zen gehiegizkoa; izan ere, itsasontzi, aireontzi eta kostaldeetan finkatutako estazio meteorologiko urrietatik jasotako informazioan oinarritzen zen. Harrezkero, satelite kopurua handitu eta beha-

keta atmosferikoetan aurrerapen zientifiko nabarmenak eman dira [8]. Ondorioz, atmosfera deskribatzen duten eredu matematikoez erresoluzio handiak izatea lortu dute. Horregatik, gaur egun, izotzaren hedapenari buruzko ezagutza askoz zabalagoa da.

Gaur egun, hiru teknika nagusi erabiltzen dira izotzaren aldaketak neurtzeko: input-output metodoak, metodo geodesikoak eta metodo grabimetrikoak. Lehenengo metodoak zonalde jakin bateko masa galeren eta irabazien diferentzia kalkulatu du. Bigarrenak, bolumen kantitatea estimatu du. Geroago, aukeratutako gunearen materialak daukan dentsitatea jakinik, bolumena masa bihurtzen du. Azkenik, hirugarrenak, eremu grabitazionalaren aldaketen bidez masaren aldaketak neurtzen ditu.

Aldaketa atmosferikoez gain, Groenlandiako masaren galeran parte hartzen duen beste faktore garrantzitsu bat, glaziarren mugimendua da. Izotzaren deformazioaren eta haren irristapenaren ondorioz, glaziarren sistema dinamikoa da. Beraz, kostaldera heltzen diren glaziar askok izotz kantitate handiak isurtzen dituzte itsasorantz. Haatik, Groenlandiako kostaldeak duen orografia konplexua dela eta, urtean zehar galdutako izotzaren kantitatea neurtzea oso zaila da. Arazo hau konpontzeko, 2019an egindako ikerketa batean, grabimetria, altimetria¹ eta input-output metodoak erabili zituzten 1992-2018 periodoko masa balantze totala eta gainazaleko balantzea kalkulatzeko. Hauen emaitzak jakinik, euren arteko diferentzia kalkulatu zuten. Horrela, esandako periodoan Groenlandiak 1827 bilioi kilogramo galdu zituela ondorioztatu zuten. Hots, %48-ko galera totala [10].

1.2 Helburuak

Gradu amaierako lan honetan Groenlandiako masaren aldakortasuna eguratsaren aldagaien funtzioan kalkulatu dugu. Horretarako, ERA-Interim europar ECMWF zentroko datuak erabili ditugu. Datu hauek 1979-2018 periodoan eskuragarri daudenez, erreanalisa² urte horietarako egingo dugu. Gainera, masaren balantzeaz gain, uhartearen kriosfera eta atmosferaren arteko energiaren trukaketa netoa kalkulatu dugu. Azken finean, masaren galerak (irabaziaz) gainazalaren energiaren irabaziekin (galerekin) estuki lotuta daude.

Laburbilduz, hauek izango dira gradu amaierako lanaren helburu nagusiak:

- Energiaren eta ur masaren balantzeen oinarri teorikoa ulertzea. Horretarako, lehenengo eta behin, atmosferaren oinarriko ekuazio termo- eta hidrodinamikoak garatu ditugu. Geroago, masa eta energiaren balantzeak landuko ditugu, latitude eta longitude jakin batzuetarako. Atal hau garatzeko [11] liburuan oinarrituko gara.
- Eredu numerikoetatik lortutako informazioa Groenlandiako gainazalean aplikatzea.
- Bi balantzeetan lortutako emaitzak alderatzea eta eztabaidatzea.

¹Metodo geodesikoaren barruan dagoen teknika konkretua. Teknikaren informazio gehiago [9]-ko 9. kapituluari aurkitu daiteke.

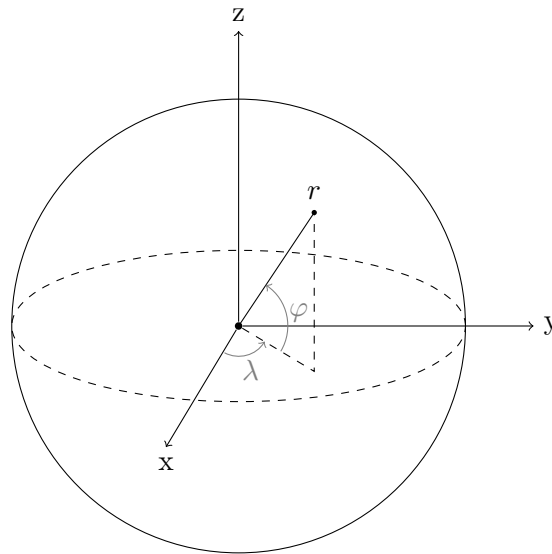
²Aintzinako datu meteorologiko eta klimatikoak onartzen dituen proiektua, bereganatze sistema numeriko baka-rraren bitartez.

- Lortutako emaitzak bibliografiako emaitzekin alderatzea eta eztabaidatzea.

Notazioa

Hauek izango dira lanean zehar onartuko ditugun hitzarmenak:

- Bektoreak adierazteko gezi bakarra erabiliko da aldagaiaren gainean. Adibidez: \vec{a}
- Airearen abiadura tridimentsionala \vec{c} bektorearen bidez adieraziko da. Bestaldetik, airearen abiadura bidimentsionala \vec{v} -ren bidez adieraziko da.
- Estres tentsore tridimentsionala $\vec{\tau}$ moduan adieraziko da.
- Fluxu bertikalak positibotzat hartuko dira baldin eta lurraren barrurantz badoaz.
- Espazioaren bataztestekoa $\{ \}$ ikurren bitartez adieraziko da.
- Denboraren bataztestekoa $(-)$ ikurraren bitartez adieraziko da.
- Ohiko deribatu partziala adierazteko ∂ eragilea erabiliko da.
- Ohiko biderkadura eskalarra (\cdot) ikurraren bitartez adieraziko da.
- Ohiko biderkadura bektoriala (\times) ikurraren bitartez adieraziko da.
- \vec{a} eta \vec{b} tentsoreen arteko biderkadura $(:)$ ikurrarekin adieraziko da. Hots: $\vec{a} : \vec{b}$
- $\nabla \vec{a} = \frac{\partial a_x}{\partial x} + \frac{\partial a_y}{\partial y} + \frac{\partial a_z}{\partial z}$ da.
- $\nabla A = (\frac{\partial A}{\partial x}, \frac{\partial A}{\partial y}, \frac{\partial A}{\partial z})$ da.
- Dibergentzia eta errotazionalaren adierazpenak kordenatu polar esferikoetan —meteorologian ohikoa den konbentzioarekin— egongo dira emanda, (1.1) irudian ikusten den bezala. Hau da, longitudearen, latitudearen eta altueraren funtzioan, (λ, φ, r) hurrenez hurren.



Irudia 1.1: latitude (φ) eta longitude (λ) angeluetan oinarritutako kordenatu polar esferikoak.

Kapitulua 2

Oinarri teorikoa

2.1 Atmosferaren oinarrizko ekuazioak

Mundu osoko hidrosfera hiru azpisistema nagusietan banatzen da. Lehenengoak, ozeanoetako urak biltzen ditu. Bigarrenak, atmosferako ura. Hirugarrenak berriz, lur solidoaren gaineko eta azpikoa urak biltzen ditu. Azpisistema bakoitzaren konplexutasun maila dela eta, zenbait hurbilketa egin daitezke eredu eta ekuazioen bidez deskribatu ahal izateko. Atmosferaren kasuan, esaterako, azpisistema termo-hidrodinamiko homogenea, jarraitua eta gas ideala dela kontsideratu daiteke.

2.1.1 Jarraitasunaren ekuazioa

Kontsidera dezagun δm masako eta ρ dentsitatea duen δV bolumen txikiko gune bat. Masaren kontserbazio printzipioagatik

$$d(\rho\delta V)/dt = 0. \quad (2.1)$$

Hau da,

$$-\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{\delta V} \frac{d}{dt} \delta V. \quad (2.2)$$

(2.2) ekuazioko eskumaldeko zatiak bolumen infinitesimalaren hedapen-abiadura adierazten du, hau da, haizearen abiadura bektorearen dibergentzia. Beste era batera esanda, fluidoaren erreferentzia-sistema erabiliz,

$$\frac{d\alpha}{dt} = \alpha \nabla \vec{c}, \quad (2.3)$$

non, $\alpha = 1/\rho$.

Dentsitatea espazioaren eta denboraren funtzioa izanik, $d\rho/dt$ hurrengo moduan luzatu daiteke:

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + u\frac{\partial\rho}{\partial x} + v\frac{\partial\rho}{\partial y} + w\frac{\partial\rho}{\partial z} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \vec{c} \cdot \nabla\rho. \quad (2.4)$$

Hortaz, jarraitasunaren ekuazioa **modu lokalean** berridatzi daiteke hurrengo moduan:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -\nabla\rho\vec{c}, \quad (2.5)$$

$$\text{non } \nabla\rho\vec{c} = \rho\nabla\vec{c} + \vec{c} \cdot \nabla\rho.$$

Oreka hidrostatikoa, presio bertikalaren gradientek (dp/dz) grabitatearen indarra ($-\rho g$) berdintzen du, hau da, $dp = -\rho g dz$. Egoera partikular batzuetan izan ezik, atmosfera oreka hidrostatikoa aurkitzen da, horregatik, (x, y, z, t) koordenatu sistema erabili beharrean (x, y, p, t) erabiltzen da. Hori dela eta, sistema berrian, $\delta m = -\delta x \delta y \delta p / g$ bezala adierazi dezakegu. Hortaz, jarraitasunaren ekuazioa ondorengo moduan adierazten da:

$$\frac{d}{dt}\delta m = 0,$$

edo

$$\frac{1}{\delta m} \frac{d}{dt}\delta m = \frac{1}{\delta x \delta y} \frac{d}{dt}(\delta x \delta y) + \frac{1}{\delta p} \frac{d}{dt}(\delta p) = 0,$$

edo

$$\nabla\vec{v} + \frac{\delta f}{\delta p} = 0, \quad (2.6)$$

non $f = dp/dt$ abiadura bertikala den baldin eta presioa koordenatu bertikala bada.

Bestaldetik, demagun eskuartean daukagun masa azeleraziorik gabeko erreferentzia sistema batean kokatzen dugula. Newtonen bigarren legearen ondorioz, i.e, momentu linealaren kontserbazio legeagatik, esan dezakegu masak hiru modutan gal dezakela momentua: masaren gainean eragiten duten indarren bidez, esate baterako, grabitazio indarra; eremuaren mugaldetan parte hartzen duten indarren ondorioz, presioa adibidez; eta, mugaldeetan gertatzen diren momentu desberdineko masen trukaketaren ondorioz, marruskadura efektuak barne.

Hortaz, masa horren gaineko indar guztiak batuz horrela geratzen dira *momentu linealaren kontserbazioaren ekuazioak*:

$$\frac{d\vec{c}}{dt} = -2\Omega \times \vec{c} - \nabla\vec{c} + \vec{g} + \vec{F}_r. \quad (2.7)$$

2.1.2 Ur-lurrunaren ekuazioa

Aire-heze masa unitatean dagoen ur lurrunaren kantitatearen denborarekiko aldaketari (masa unitateko) ur lurrunaren balantzea esaten zaio:

$$\frac{dq}{dt} = s(q) + D, \quad (2.8)$$

non q hezetasun espezifikoa eta $s(q) = e - c$ den, e eta c masa unitateko baporazioa eta kondentsazioa izanik, hurrenez hurren. Izatez, atmosferako ur lurrunaren iturri nagusiak kondentsazioa eta baporazioa dira.

Bestaldetik, atmosferan dagoen presio-diferentziaren ondorioz ur lurrunaren molekulak alde batetik bestera mugitzen dira. Hori dela eta, bero espezifikokoaren aldaketaren ekarpen bat molekula hauen mugimendua da. Izan ere, difusio molekularragatik agertzen den ur lurrunaren galera da (2.8) ekuazioan agertzen den D terminoaren esangura fisikoa.

2.1.3 Termodinamikaren lehenengo legea

Kontsidera dezagun airea sistema simple eta homogeneoa dela, hau da, hodeirik gabekoa. Gibb's-en fase legeagatik jakin badakigu hiru aldagai independente (eta intentsibo) behar direla haren sistema termodinamikoa guztiz zehazteko. Alde batetik tenperatura, T ; bestaldetik, frakzio molar erlatiboa, x_i ; eta azkenik, presioa P .

Atalaren hasieran esan den bezala, atmosfera osatzen duten fluido diferenteek gas idealen legea jarraitzen dute. Horrez gain, onartuko dugu sistemako presio totala partaide bakoitzaren presio partzialen batura izango dela, i.e, Daltonen legea jarraitzen duen sistema daukagula eskuartean.

Aurrekoa kontuan hartuz, gas idealen legea aire lehorrerako horrela idazten da:

$$p\alpha = R_d T, \quad (2.9)$$

non R_d ($287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) aire lehorra osatzen duen gas-nahasketari dagokion konstantea den.

Energiaren kontserbazio legea, termodinamikaren lehenengo legearen bidez adieraz daiteke. Hor-taz, (2.9) erabiliz:

$$C_p \frac{dT}{dt} = Q + \alpha \frac{dp}{dt}, \quad (2.10)$$

non C_p eta Q bero espezifikoa presio konstantean eta, bero netoa masa unitateko diren, hurrenez hurren.

2.2 Masa

Masa balantzeak eskualde jakin batean sartzen den eta irteten den ur kantitatearen diferentzia neurtzen du.

Kriosferako¹ ekarpen positiboei *akumulazio* deritzegu. Bestaldetik, eskualdeko masa galeran parte hartzen duten ekarpenen multzoari *ablazio* deritzogu. Masaren portzentai nabarmen bat sublimazioaren edo baporazioaren bidez galtzen da. Horretaz gain, Lurraren gainazaletik edo lur-azpitik urtzen den izotz kantitateari *isurketa* eta *lur-azpiko isurketa* deritzegu.

Hortaz, aurrekoa kontuan hartuz eta eskualde jakin baterako jarraitasunaren printzipioa aplikatuz, masa balantzearen ekuazioa ondorengo moduan adierazi daiteke:

$$\frac{dS}{dt} = P - E - R_0 - R_u, \quad (2.11)$$

non

S = masa totala azalera unitateko,

E = lurrunduriko zein sublimaturiko masa kantitatea denbora eta azalera unitateko,

R_0 = isurketaren kantitatea denbora eta azalera unitateko ,

R_u = lur-azpiko isurketaren kantitatea denbora eta azalera unitateko.

Eremu handietan R_u -ren balioa beste terminoekin konparatuz askoz txikiagoa da; hortaz, arbuia-garrizat hartu daiteke. Honekin batera, lurraldearen eta denboraren batezbestekoak kalkulatu, horrela adierazi dezakegu (2.11) ekuazioa:

$$\frac{d\{\bar{S}\}}{dt} = \{\bar{P}\} - \{\bar{E}\} - \{\bar{R}_0\}, \quad (2.12)$$

2.2.1 Ur-lurraren balantze ekuazioa

Har dezagun lurraren gainazaletik atmosferaren goiko gainazalera ino doan azalera unitateko aire zutabea. Honen barnean daukagun ur-lurraren kopurua ondorengo ekuazioaren bidez adierazten da:

$$W(\lambda, \varphi, t) = \int_0^{p_0} q \frac{dp}{g}, \quad (2.13)$$

non q hezetasun espezifiko den eta p_0 Lurraren gainazaleko presioa den.

¹Kriosfera, Lurraren gainazaleko gune izoztuak deskribatzen dituen terminoa da.

Hitz batzuekin esanda: atmosferako azalera unitateko zutabeko ur lurruna kondentsatuko bagenu, lorturiko ur likidoaren masa W -rena izango litzateke.

Bestaldetik, atmosferan daukagun ur-lurruna horizontalki mugitu daiteke baita ere. Hau, “aireko isurketa” bezala ezagutzen da (uraren bertikalki integraturiko garraio horizontala, alegia, $[kg/(ms)]$ unitateetan adierazita). Haren balioa, ur-lurrunaren garraioa integratuz lortzen da (presioaren funtzioan). Hau da:

$$\vec{Q}(\lambda, \varphi, t) = \int_0^{p_0} q\vec{v} \frac{dp}{g} = Q_\lambda \hat{i} + Q_\varphi \hat{j}. \quad (2.14)$$

Aurreko ekuazioan ikusten den bezala, ur-lurrunaren garraioaren norabidea bi osagaien konbinazio lineal moduan adierazten da: osagai zonala (paraleloekiko ukitzalea, positiboa ekialderantz) eta meridionala (meridianoekiko ukitzalea, positiboa iparrerantz). Q_λ osagaiak λ latitude konstantearen zeharreko ur-lurrunaren fluxua adierazten du, Q_φ -k berriz, φ meridianoaren zeharreko fluxua.

Aldi berean, (2.8) ekuazioa eta (x,y,p,t) sisteman emandako jarraitasunaren ekuazioa ((2.6)) konbinatuz, atmosfera osoko ur-lurrunaren balantze ekuazioa lortzen da:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla q \vec{v} + \frac{\partial(qf)}{\partial p} = s(q) + D. \quad (2.15)$$

Aurreko atalean esan bezala $s(q)$ -ren balioa baporazioaren eta kondentsazioaren arteko diferentziat hartuko dugu. Bestaldetik, D , difusio prozesuaren bidez adierazten da Fick-en legearen arabera. Hau da: $D = -\alpha \nabla \cdot \vec{J}_q^D$.

Ur-lurrunarekin jarraituriko prozedura berdina erabiliz, egoera kondentsatuan dagoen uraren balantze ekuazioa adierazi daiteke. Oraingoan berriz, $s(q_c)$ -ren balioa $s(q)$ -ren berdina da, baina kontrako zeinuarekin. Azken finean, bolumen unitatean sortzen den ur-kondentsatuaren kantitatea, ur-lurrunaren suntsiketarik dator (eta kontrakoa). Hortaz,

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} + \nabla q_c \vec{v} + \frac{\partial(q_c f_c)}{\partial p} = -(e - c). \quad (2.16)$$

Ekuazio honetan, f_c -k kondentsaturiko ur tanten abiadura bertikala adierazten du. Bestaldetik, $q_c f_c$ -k ur kondentsatuaren garraio bertikal netoa adierazten du.

Ur-lurrunarentzat eta ur-kondentsatuarentzat lorturiko balantze ekuazioak batuz, ur totalaren balantze ekuazioa lortzen dugu:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla q \vec{v} + \frac{\partial(qf)}{\partial p} + \frac{\partial q_c}{\partial t} + \nabla q_c \vec{v} + \frac{\partial(q_c f_c)}{\partial p} = D. \quad (2.17)$$

Atmosfera osorako balantze ekuazioa lortzeko, atalaren hasieran harturiko tarte bertikalean integratu behar da (2.17) ekuazioa. Hortaz,

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \vec{Q} + \frac{\partial W_c}{\partial t} + \nabla \vec{Q}_c + P = E, \quad (2.18)$$

non E eta P gainazalaren gaineko baporazioa eta prezipitazioa diren, hurrenez hurren.

Kasu gehienetan, $\partial W_c/\partial t \ll \partial W/\partial t$ eta $\nabla \vec{Q}_c \ll \nabla \vec{Q}$. Beraz, bi terminoak arbuigarriztat hartuko ditugu. Bestaldetik, denboraren eta gune jakin bateko batezbestekoa kontsideratuz, horrela berridazten da aurreko ekuazioa:

$$\left\{ \frac{\partial \bar{W}}{\partial t} \right\} + \{ \nabla \vec{Q} \} = \{ \bar{E} - \bar{P} \}. \quad (2.19)$$

Gainera, Gauss-en teorema erabiliz:

$$\left\{ \frac{\partial \bar{W}}{\partial t} \right\} + \frac{1}{A} \oint (\vec{Q} \cdot \vec{n}) dl = \{ \bar{E} - \bar{P} \}, \quad (2.20)$$

non A eskualdearen azalera osoa eta \vec{n} mugaldearen perpendikularra den bektore unitarioa diren, hurrenez hurren.

Izatez, Lurraren gainazaleko sublimazioa eta ebapotranspirazioa (lurretik lurruntzen den ura) neurtzea oso zaila da lur eremu handiak aztertzen direnean. Horregatik, emaitza zehatzagoak lortzeko uraren zikloa deskribatzen duten ekuazioak aztertzen dira atmosferaren ikuspuntutik (atal honetan egin dugun bezala). Azken finean, lurra dituen masa galerak lurrunketaren ondorioz, atmosferaren irabaziak dira (eta kontrakoa). Hortaz, (2.20) ekuazioak, $\{ \bar{E} - \bar{P} \}$ kenketa, W eta Q batugaien bitartez adierazi dezakegula esaten digu.

2.3 Energia

Atmosferan aurkitzen ditugun funtsezko energia motak ondorengoak dira: barne energia (I), energia potentzial grabitatorioa (ϕ), energia zinetikoa (K) eta uraren fase trantsizioekin lotuta dagoen bero sorra (LH). Hauek dira energia mota bakoitzaren adierazpen matematikoak masa unitateko:

$$I = C_v T, \quad (2.21)$$

$$\phi = gz, \quad (2.22)$$

$$K = \frac{1}{2} c^2. \quad (2.23)$$

Atmosferako ura, hiru modutan agertu daiteke: egoera solidoan, likidoan edo gas egoeran (ur-lurruna). Egoera-fase batetik bestera aldatzeko beharrezkoa den energia kantitateri bero sorra deritzo. Ikuspuntu termodinamikoetik bero sorra barne energia forma bat izan arren, lan honetan bakoitza bere aldetik kontsideratuko dugu. Hortaz:

$$LH = Lq, \quad (2.24)$$

non L fase aldaketaren funtzioan dagoen konstantea den. Esate baterako, lurrunketarekin loturiko $L = L_e (= 2501 Jg^{-1})$.

Aurreko adierazpen guzti hauen baturak, atmosferan izango dugun energia totala ematen digu (masa unitateko). Hots:

$$e = I + \phi + LH + K. \quad (2.25)$$

Bestaldetik, kanpo energia mota garrantzitsuena eguzkitik datorren erradiazioa da. Eguzki-erradiazioak bai atmosfera, bai azpiko geruzak berotzen ditu uhin luzeko erradiazioaren (Lurrak igorritakoa) xurgapenaren bitartez.

2.3.1 Energia balantzearen ekuazioak

Energia potentzialaren denborazko aldaketa masa unitateko ondorengo ekuazioaren bitartez adierazten da:

$$\frac{d\phi}{dt} = g\omega, \quad (2.26)$$

non $\omega = dz/dt$ den.

Bestaldetik, (2.21) ekuazioa deribatuz eta (2.3) eta (2.10) ekuazioak erabiliz barne energiaren aldaketa masa unitateko horrela definitzen da:

$$\frac{dI}{dt} = Q - p\alpha\nabla\vec{c}, \quad (2.27)$$

non $Q = Q_s + Q_f$

Azkenengo ekuazioan, Q bero diabatikoa, bi zatitan deskonposatu dezakegu. Alde batetik, bero-erradiazioa, bero sorra eta eroapen bero-fluxua batzen dituen terminoan, Q_s , eta bestaldetik, marruskadura hondatzearekin loturiko parametroan, Q_f .

$$\begin{aligned} Q_s &= -\alpha\nabla\vec{F}_{rad} - L(e - c) - \alpha\nabla\vec{J}_H^D, \\ Q_f &= -\alpha\vec{\tau} : \nabla\vec{c} \end{aligned} \quad (2.28)$$

(2.26) eta (2.27) ekuazioak batuz, gure sistemaren energia potentzial totala lortzen dugu:

$$\frac{d}{dt}(\phi + I) = gw + Q - p\alpha\nabla\vec{c} \quad (2.29)$$

edo

$$\frac{d}{dt}(\phi + I) = gw + Q - \alpha\vec{c} \cdot \nabla p - \alpha\nabla p\vec{c}. \quad (2.30)$$

Energia zinetikoa, bestaldetik, (2.7) ekuaziotik ondorioztatu daiteke:

$$\frac{dK}{dt} = -gw - \alpha\vec{c} \cdot \nabla p - \alpha\vec{c} \cdot \nabla\vec{\tau}. \quad (2.31)$$

Gainera, azken adierazpen honi zenbait aldaketa aplikatuz:

$$\frac{dK}{dt} = -gw - p\alpha\nabla\vec{c} - \alpha\nabla(p\vec{c} + \vec{\tau} \cdot \vec{c}) - \alpha\vec{\tau} : \nabla\vec{c}. \quad (2.32)$$

Azkenik, bero sorraren kasurako (2.8) ekuaziotik:

$$L\frac{dq}{dt} = L(e - c) - L\alpha\nabla\vec{J}_q^D. \quad (2.33)$$

Azkenengo terminoa mugaldeetan dagoen hurrun-fluxuaren difusio molekularrarekin dago erlacionatuta.

Hortaz, atmosfera osoko energiaren aldaketa (masa unitateko) (2.30), (2.31) eta (2.33) ekuazioen batura bezala kalkulatu dezakegu:

$$\frac{de}{dt} = -\alpha\nabla\vec{F}_{rad} - \alpha\nabla p\vec{c} - \alpha\nabla(\vec{J}_h^D + L\vec{J}_q^D + \vec{c} \cdot \vec{\tau}). \quad (2.34)$$

Orain arte erabilitako adierazpenak nomenklatura Lagrangearrean garatu ditugu. Geroago azalduko den moduan, espazioa modu diskretuan zatituko dugu eta “grid” bakoitzeko balioak aztertuko dira. Hori dela eta, ekuazioak egitura Eulearrean berridaztea da komenigarriena. Hortaz, (2.34) ekuazioa berridatziz:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} = -\nabla J_H - \nabla(\vec{F}_{rad} + \vec{F}_s + \vec{F}_l) - \nabla(\vec{c} \cdot \vec{\tau}), \quad (2.35)$$

non $\vec{F}_s = \vec{J}_h^D$, $\vec{F}_l = L\vec{J}_q^D$, $J_H = -\nabla(\rho e + p)\vec{c}$ bero-fluxu sentikorra, bero sorraren fluxua eta entalpia totalaren garraioak diren, hurrenez hurren.

2.3.2 Bolumenezko integralak

Energia totalaren balantze ekuazioa, (2.35), are gehiago moldatu daiteke zenbait aldaketa eginez.

Lehenik eta behin, koordenatu kartesiarrak koordenatu esferikoetan bihurtzea da komenigarriena. Gainera, lanean proposatzen den erreanilisia lurreko gainazaletik troposferaren goiko geruzetaraino garatzen denez, egitura meheko hurbilketa aplikatu daiteke. Hau da, $R + z \simeq R$ non R , lurraren erradioa den. Hortaz, (2.35) ekuazioa horrela adieraz daiteke:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} = -\frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial J_{h\lambda}}{\partial \lambda} - \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial(J_{h\varphi} \cos \varphi)}{\partial \varphi} - \frac{\partial J_{hz}}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} [F_{radz} + F_{sz} + F_{lz} + (\vec{\tau} \cdot \vec{c})_z]. \quad (2.36)$$

Aurreko ekuazioaren azkenengo atalean bero-fluxu sentikorraren, sorraren, erradiazio fluxuaren eta tentsio marruskadurarekin loturiko osagai bertikalak soilik hartu dira kontuan. Osagai horizontalak berriz arbuia garrantzat hartu ditugu [11].

Kontsidera dezagun longitude eta latitude jakin batzuegatik mugatutako zonaldea. Zonalde horretan (2.36) ekuazioa integratuz, lurreko gainazaletik atmosferaren goiko gainazaleraingaino daukagun energia netoa lortzen dugu. Hala ere, Groenlandiako gainazaleko energia balantzea helburutzat daukagunez, zentzuzkoena da integrazioaren bidez lorturiko emaitzetik gainazaleko ekarpena kontuan izatea solik. Hortaz, alde batetik Lur-gainazala ez dugunez fluido bat bezala kontsideratzen, eskala handiko entalpia garraioaren ekarpena nulutzat har dezakegu [12]. Bestaldetik, esan bezala, atmosferaren goiko gainazaleko erradiazioa ez dugu kontuan izango. Gainera, aztertuko dugun denbora tartea luzea izango denez eta aztertzen gauden eremua oso zabala denez, egokia da energiaren denborarekiko eta bai espazioarekiko batezbestekoak kontsideratzea.

Aurreko guztia kontuan hartuz, gure gainazaleko energia deribatuaren ekuazioa horrela geratuko litzateke:

$$\frac{\partial\{\bar{E}_L\}}{\partial t} = \{\bar{F}_{rad}^{surf}\} + \{\bar{F}_s^{surf}\} + \{\bar{F}_l^{surf}\}, \quad (2.37)$$

non

$$F_{rad}^{surf} = \text{erradiazio-fluxu netoa } [J/(m^2s)]\text{-tan,}$$

$$F_s^{surf} = \text{bero sentikorraren fluxua } [J/(m^2s)]\text{-tan,}$$

$$F_l^{surf} = \text{bero sorraren fluxua } [J/(m^2s)]\text{-tan.}$$

Esan bezala, F_{rad}^{surf} -ek lurraren gainazaleko erradiazio-fluxu netoa adierazten du. Hau da, eguzkitik datorren fluxu netoaren eta lurra igorritako erradiazio-fluxu netoaren batuketara:

$$F_{rad}^{surf} = F_{eguz} + F_{lurr} \quad (2.38)$$

Eguzkitik lurrera heltzen den erradiazioa, uhin-luzera laburreko erradiazio bezala ezagutzen da. Izatez, eguzkia $T=6000\text{K}$ -eko (batezbestekoan) tenperaturan eta $[0.2, 0.3]\mu\text{m}$ uhin-luzera tartean igortzen duen gorputz beltz bat bezala kontsideratu daiteke. Hala ere, lurreko atmosferaren goiko partearaino heltzen den erradiazio kantitatearen %51-a soilik heltzen da lurreko gainazalera. Portzentai horretatik, %26-a erradiazio difuso bezala heltzen da atmosferaren sakabanaketaren ondorioz, beste %25-ak ordea, modu zuzenean erasotu egiten du lurreko gainazala. Gainontzeko erradiazioa, gainazal desberdinen islapenaren eta atmosferako gasen xurgapenaren bitartez galtzen da.

Bestaldetik, lurraren gainazaleko tenperatura eguzkiarena baino askoz txikiagoa da, gutxi gorabehera 290K -koa. Ondorioz, igorritako uhin luzera $[2, 30]\mu\text{m}$ -ko tartean dago. Horregatik, lurreko erradiazioa uhin-luzera luzeko erradiaziotzat ezagutzen da. Aurreko kasuan bezala, lurreko gainazaletik igortzen den erradiazioaren zati bat, islapenaren bitartez bueltatzen da jatorrira. Gainontzekoa berriz, atmosferako gas desberdinek xurgatzen dute. Bereziki, ur lurruna eta CO_2 -a.

Laburbilduz, lurraren gainazaleko erradiazio netoa ondorengo moduan adierazi dateke:

$$F_{rad}^{surf.} = F_{eguz \downarrow} - F_{eguz \uparrow} + F_{lurr \downarrow} - F_{lurr \uparrow}, \quad (2.39)$$

non \downarrow ikurrak Lurraren barnealdera zuzendutako fluxua adierazten duen, \uparrow ikurrak Lurraren kanporantza zuzendutako fluxua adierazten duen bitartean.

Kapitulua 3

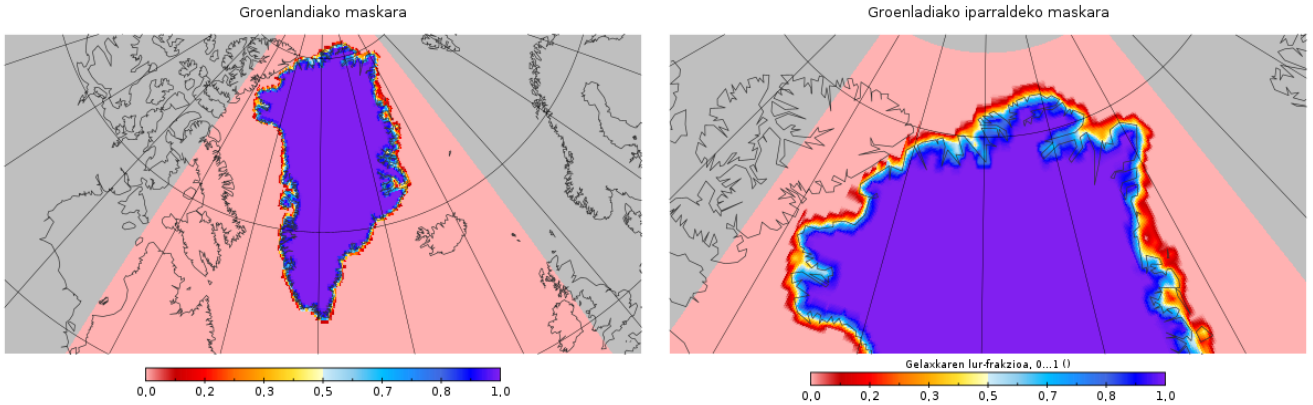
Datuak

Masa eta energiaren balantzeak kalkulatzeko Copernicus (Europar Batasuneko Lurraren behaketa programa) zentroak eskaintako ERA-Interim erreanalisi produktua erabili dugu. Honek, ezartzen ditugun mugalde baldintzen barruko datuak eskaintzen dizkigu NetCDF motatako fitxategietan. Mota honetako formatuek aldagai multidimentsionalak modu matrizialean gordetzen dituzte. Geroago, modu eraginkorrean kudeatzeko helburuarekin [13].

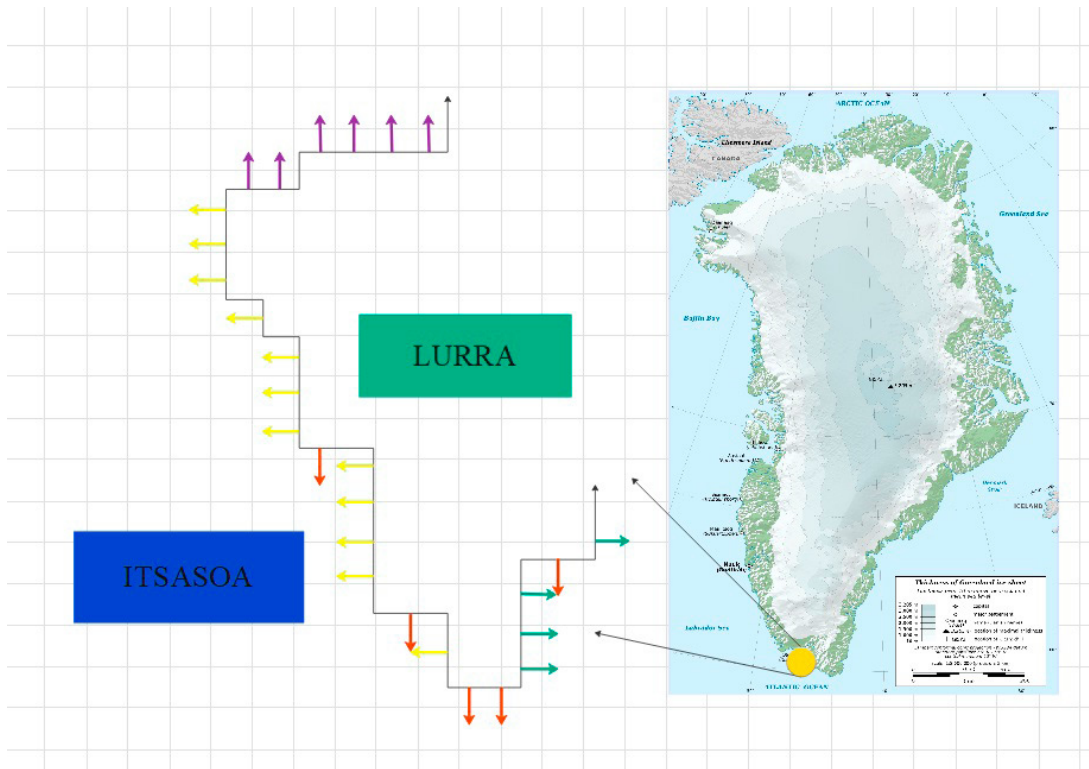
Deskargatu ditugun aldagaien multzoak bi taldetan banatzen dira. Alde batetik, egunen batezbestekoen hilabeteko batezbesteko metaketa kalkulatzeko dutenak (prezipitazioa, baporazioa, eguzki-erradiazioa...), eta bestaldetik, eguneko batez besteko hilabeteko batezbestekoak kalkulatzeko dutenak (ur-lurrunaren fluxuen integralak, ur lurrunaren kantitatea atmosferan...). Lehenengoak, lurraren gainazaleko mailan ematen ditu datuak, 80 Km-ko erresoluzio espazialarekin. Bigarrenak ordea, erresoluzio berdineko datuak ematen ditu, baina 60 maila desberdinetan; gainazaletik hasita 0,1 Pa-etaraino [14].

Bestaldetik, datuak kudeatzeko Python programazio lengoia erabili dugu. Izan ere, netcdf4-python eta numpy interface-ak erabiliz, jatorrizko fitxategietako datuak kudeatu ahal izan ditugu, besteak beste, Groenlandiaren inguruko mugak finkatzeko. Horretarako, egin dugun lehenengo gauza maskara bat sortzea izan da. Hau da, alde batetik Groenlandiaren inguruko ozeano puntuak nuluak bihurtu ditugu, eta bestaldetik, bai Kanadako iparraldeko zonaldea eta bai Islandia osoa eskuz ezabatu ditugu. Hortaz, Groenlandiaren kanpoko puntu guztiak zeroz bete ditugu barnekoak “bat” zenbakiarekin bete ditugun bitartean ((3.1) irudiak ikusten den bezalaxe). Horrela, erabilitako aldagai guztiak maskara horrekin biderkatzean, finkatutako mugaldeen barruan definitu ditugu. Horretaz gain, \vec{Q} -ren konbergentzia kalkulatzeko, (latitude, longitude) bikote bakoitzeko mugaldeen perpendikularra den bektore unitarioak definitu ditugu kostaldeko puntu guztietan, (3.2) eskema jarraituz. Erabilitako datuak eta programak ondorengo helbidean daude eskuragarri: <https://github.com/joseb061/ERAinterimMBEB>

Azkenik, grafikoak irudikatzeko eta kudeatzeko Panoply eta CDO (climatic data operators) *software*-a eraili ditugu, hurrenez hurren [15, 16].



Irudia 3.1: Ezkerrean Groenlandia osoko maskara. Eskuinean Groenlandiako ipar-ekialdeko zonaldearen maskara zatia. Datuak (85° I, -80° M, 45° H, -5° E) latitude- eta longitudeak mugatutako tartean deskargatu ditugu soilik.



Irudia 3.2: Koloredun geziek bektore unitarioak adierazten dute. Gora edo eskuinera begira daudenak balio positiboarekin daude definituak, behera edo ezkerreara begira daudenak berriz balio negatiboarekin. Eskuineko irudiaren iturria: [17]

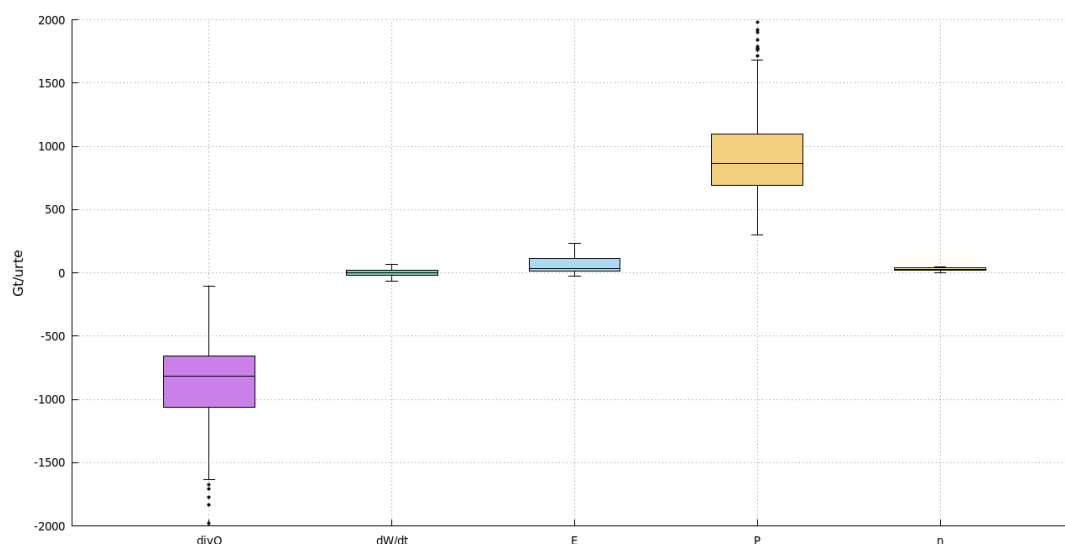
Kapitulua 4

Emaitzak eta eztabaidak

4.1 Masa balantzea

Lehenengo eta behin, 2.2.1 atalean azaldu dugun moduan, kriosferaren eta atmosferaren arteko balantzea kalkulatuko dugu. Horrela, prezipitazioari eta lurrunketari buruzko lehenengo informazioa lortuko dugu.

Printzipioz, hasieran egin ditugun hipotesiak betetzeko, (2.20) ekuazioa periodo luze batean egon behar da garatua. Horregatik, P , E , $\nabla \cdot \vec{Q}$ eta dW/dt aldagaiak Groenlandia osoan kalkulatuko ditugu 1980-2018 periodorako. Gainera, egoera idealaren kasuan esandako ekuazioko berdintza bete behar da. Beste era batera esanda, parametro guztiak ekuazioaren alde batera eramanez, lortutako hondarra nulua izan beharko litzateke.



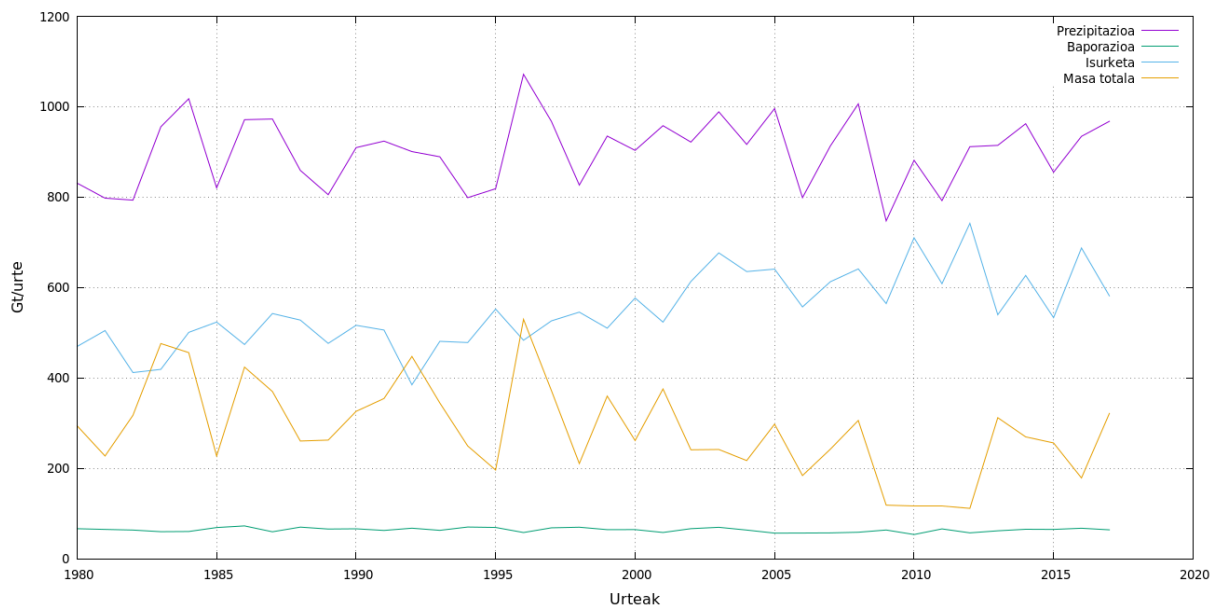
Irudia 4.1: Groenlandia osoko 1980-2017 periodorako balantze atmosferikoaren aldagaien batezbestekoa. “n” balioa-k ekuazioaren hondarra adierazten du.

(4.1) grafikoan ikusten den moduan, $\frac{\partial W}{\partial t}$ eta E batugaiak oso txikiak dira P eta $\nabla \vec{Q}$ batugaiekin konparatuta. Hau da, \vec{Q} -ren konbergentziak P azaltzen du. Horrez gain, lurraldeko temperatura baxuak direla eta E -ren (lurrunketaren) balioak oso baxuak izaten dira. Bestaldetik, (2.20) ekuazioaren hondarra $n = 25 \pm 5$ [Gt/urte]-koa da. Hau da, balioa 0-ra hurbiltzen da espero genuen moduan. Beraz, lehenengo berdintzatik $E - P = -837 \pm 26$ [Gt/urte] dela ondorioztatu dezakegu.

Behin hau lortu dugula, gainazaleko masa balantzea kalkulatu dugu. Horretarako, bi garapen mota egingo ditugu. Alde batetik, denborazko garapena eta bestaldetik garapen espaziala.

Denborazko garapena.

(4.8) grafikoan ikusten den bezala 1980-1992 urte periodoan zehar masa balantzeko batugaiak nahiko egonkor mantendu ziren. Urte horretatik aurrera, ordea, beherakada bat dagoela susmatu daiteke. Hortaz, periodo osoa bi azpi-periodoetan banatu dugu eta bakoitzeko aldagaien batezbestekoak konparatu ditugu. Lehenengo urte periodoa 1980tik 1992ra hartuko dugu; bigarrena, ordea, 1993tik 2018ra.



Irudia 4.2: Prezipitazioaren, baporazioaren, isurketaren eta GMA-aren batezbestekoak 1980-2018 periodoan zehar.

Prezipitazioa, lehenengo periodoan, 1017 [Gt/urte] eta 793 [Gt/urte] balioen artean mantendu zen. Gainera, periodo honen batzbestekoa 889 ± 46 [Gt/urte]-koa izan zen. Bestaldetik, bigarren periodoan lortutako emaitzetan ez da hautematen aldaketa handirik. Beraz, tendentziaren aldaketa garrantzi gutxikoa izan zela ondorioztatu dezakegu preipitazioaren kasuan. Halaber, ebaporazioaren kasuan bi periodoetako batezbesteko emaitzak %4,54-an desberdintzen dira.

Bestaldetik, isurketaren kasuan, joera aldaketa argia ikusten da 1992. urtetik aurrera. Lehenengo periodoan lortutako maximoa 542 [Gt/urte] izan zen. Bigarrenean berriz, 742 [Gt/urte]-tara heldu zen 2013. urtean. Guztira, periodo osoan batezbesteko 549 ± 26 [Gt/urte] galdu ziren

izotzaren urtzearen ondorioz, (4.1) taulan ikus daiteken moduan.

Azkenik, balantze totala kalkulatzeko bigarren ataleko (2.12) formula berreskuratu dugu. Aurretik esan dugun moduan, hiru aldagaiak egoera semiegonkorrean mantendu ziren lehenengo periodoan zehar. Bigarren periodoan berriz, aldagai guztiek jasandako joera aldaketaren ondorioz, eta batez ere isurketaren gorakadaren ondorioz, MB-aren batezbestekoak %23,23-ko erorketa izan zuen. Hau da, 342Gt/urte-ko irabaziak izatetik 261Gt/urte-ko irabaziak izatera. Hala ere, balio hauen aldaketen esanguratasun estatistikoa ez da aztertua izan.

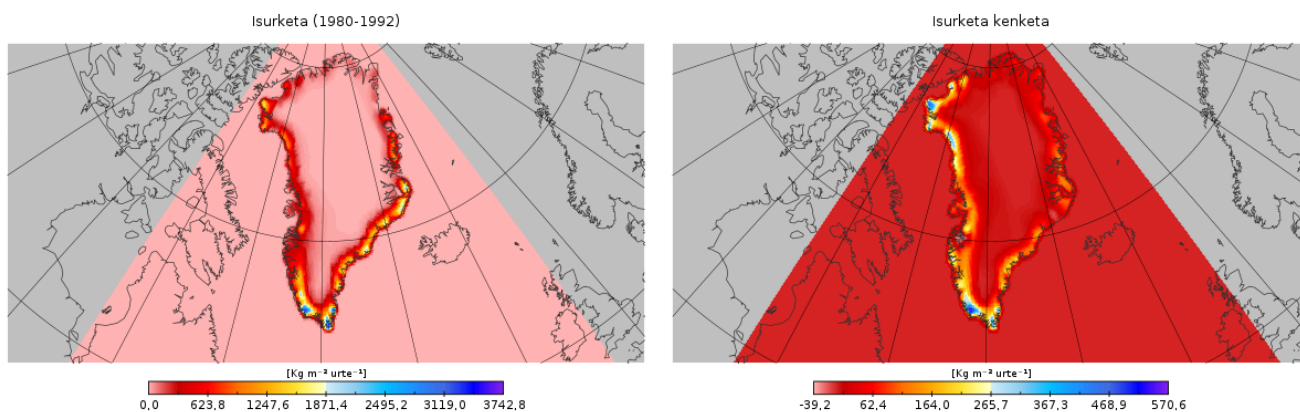
Taula 4.1: Periodo desberdinetako MB-aren aldagaien batezbestekoak [Gt/urte]-tan, euren errore estandararekin eta MB-aren balio totala. (P) prezipitazio totala da,(E) lurrunketaren eta sublimazioaren batura eta (R) gainazaleko isurketaren balioa.

	P	E	R	MB_{tot}
1980-1992	889 ± 46	66 ± 2	482 ± 30	342 ± 53
1993-2018	908 ± 31	63 ± 2	583 ± 30	261 ± 40
1980-2018	901 ± 25	64 ± 1	549 ± 26	288 ± 33

Garapen espaziala.

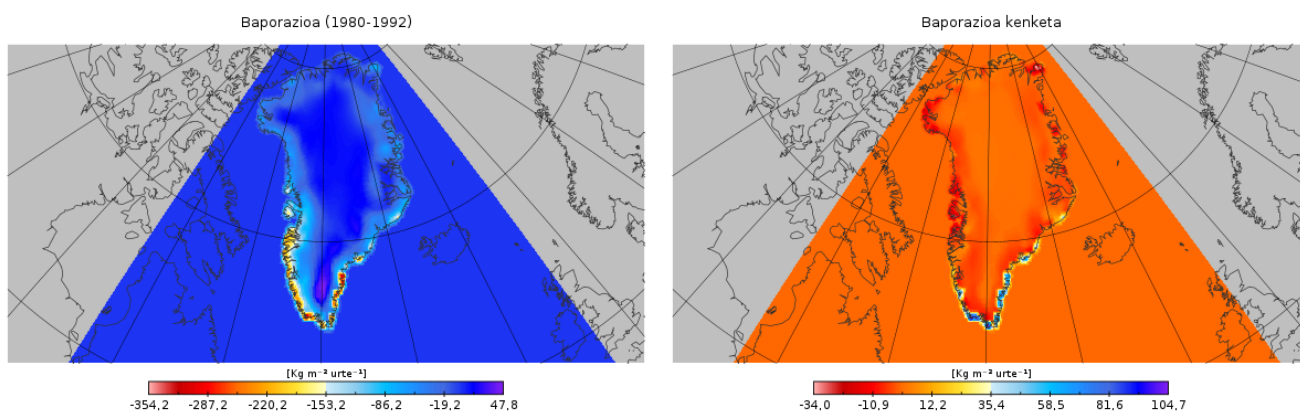
Aurreko azpiatalean ikusi dugun moduan, 1993-2018 periodoan, isurketaren hazkundera masa totalaren beherapenaren arrazoi nabariena izan zen. Hala ere, masa galera ez da batere uniforme izan. Joera aldaketa honek izan zituen ondorioak ikusteko (4.3), (4.4), (4.5) eta (4.6) mapak irudikatu ditugu. Irudiak bikoteka agertzen dira. Lehengoak 1980-1992 periodoko batezbestekoa irudikatzen du. Bigarrenak berriz, bi periodoen arteko diferentzia adierazten du.

(4.3) irudietan ikusi daitekenez, isurketaren ondorioz, Groenlandiako erdialdean galdutako uraren kopurua ia nulua izan zen bi periodoetarako. Bestaldetik, lehenengo periodoan, ur galeraren baliorik handienak hegoaldeko eta hego-ekialdeko kostaldeetan eman ziren. Honekin batera, bigarren periodoan, bai barnealdeko eta bai kostaldeko galerak handitu ziren. Bereziki, mendebaldekoak, hegoaldekoak eta ipar-mendebaldekoak.



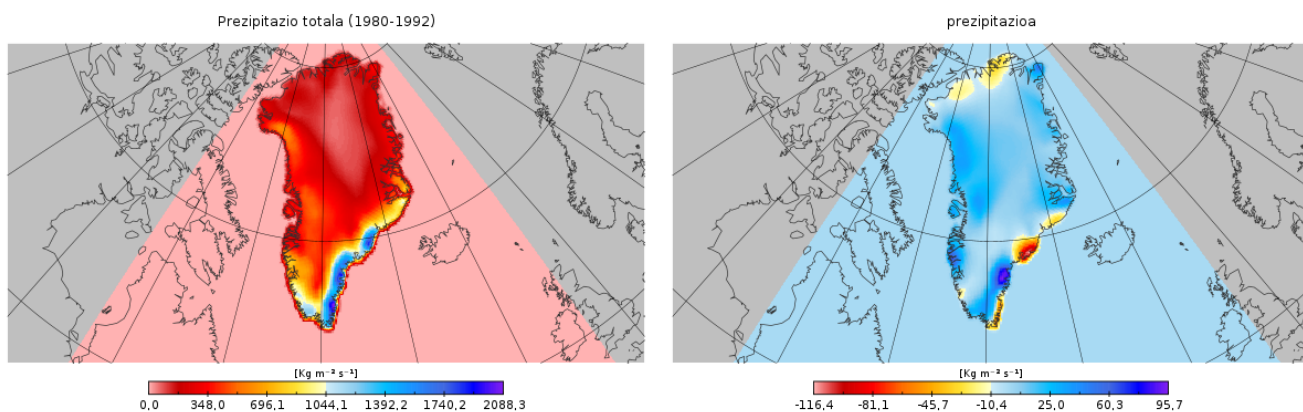
Irudia 4.3: Ezkerrean 1980-1992 periodoko isurketa totalaren batezbestekoa. Eskuinean 1980-1992 minus 1993-2018 periodoetako balioak.

Baporazioaren balioek ekarpen txikia egiten diote Groenlandiako masa totalari. Hala ere, aurreko kasuan bezala zonalde kaltetuenak hego mendebaldeko eta hego ekialdeko kostaldeak izan ziren lehenengo eta bigarren periodoetan (4.4). Gainera, zonalde hauetan emandako lurrunketaren balioak guztiz modelatu zuten lurralde osoko lurrun-fluxuaren batez bestekoa. Izan ere, (4.4) irudian ikusten den bezala, hego ekialdeko zonaldeetan lurrundutako balio maximoa $354,2 [kg/m^2 urte]$ -koa izan zen, barnealdeko zonaldeetan kondentsaturiko balio maximoa $47,8 [kg/m^2 urte]$ -koa izan zen bitartean. Bestaldetik, balio positibo esanguratsuenak (kondentsazio zonaldeak) erdialde osoan zehar eta bereziki hegoaldeko ertzean eman ziren bi periodoetan. Hortaz, akumulazio zonalde garrantzitsuenak barnealdeko zonaldeak izan ziren, kostaldeak ablazio zonaldeak izan ziren bitartean.

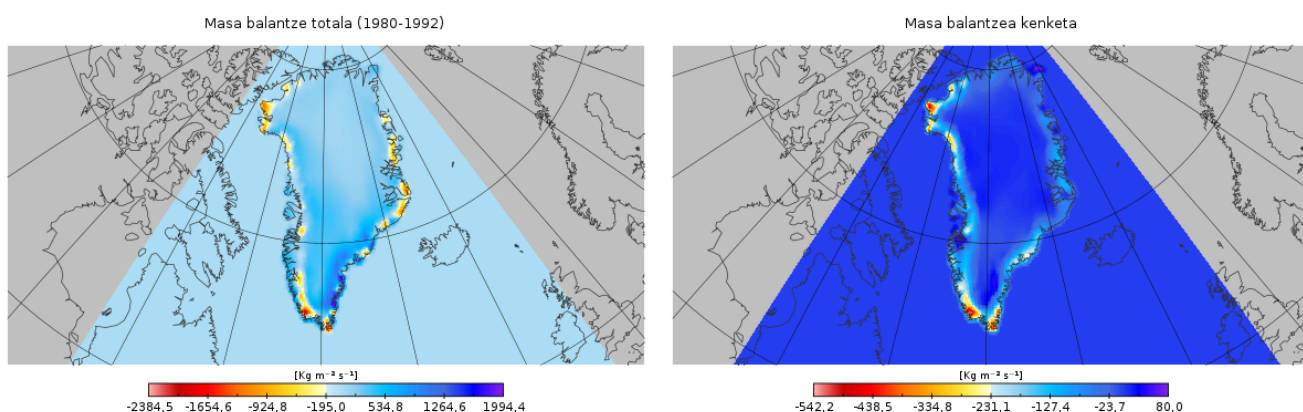


Irudia 4.4: Ezkerrean 1980-1992 periodoko baporazio-fluxu totalaren batezbestekoa. Eskuinean 1980-1992 minus 1993-2018 periodoetako balioak.

Prezipitazioarekin ostera, guztiz kontrakoa gertatzen da. Barneko zonaldeak, prezipitazio gutxien jaso zutenak izan ziren lehenengo zein bigarren periodoetan zehar. Kostaldeetan aldiz, balioak handiagoak izan ziren, maximoa hego-ekialdean kokatuz. Hala ere, hegoaldeko zonaldeetan ematen diren puntu batzuk isurketaren maximoekin bat egiten dute. Horregatik, konkretuki hegoaldeko eta hego-mendebaldeko kostaldeetan, masa totalaren batezbestekoak negatiboak izan ziren bi periodoetarako. Honen adibide grafikoa ikus daiteke (4.3), (4.5), (4.6) irudietan.



Irudia 4.5: Ezkerrean 1980-1992 periodoko prezipitazio totalaren batezbestekoa. Eskuinean 1980-1992 minus 1993-2018 periodoetako balioak.



Irudia 4.6: Ezkerrean 1980-1992 peridoko masa balantzearen batezbestekoa. Eskuinean 1980-1992 minus 1993-2018 periodoetako balioak.

4.2 Energiaren balantzea

Behin masaren tendentzia zein izan zen jakinda, portaera horren jatorria bilatuko dugu energiaren balantzearen bidez. Horretarako, aurreko atalean bezala, garapen denborala eta espazialak aztertuko ditugu ezarritako 1980-1992 eta 1993-2018 periodoetan zehar.

Denborazko garapena.

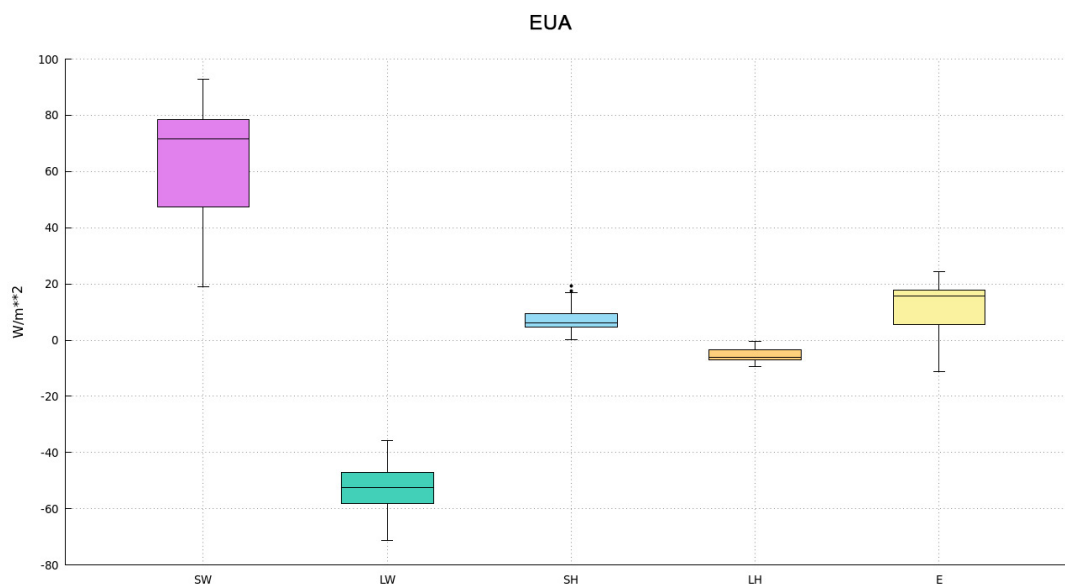
(5.1) taulan ikusten den moduan, periodo osoan izandako energia-fluxuaren batazbestekoa negatiboa izan zen. Hau da, 1980-2018 periodoan gainazalak energia galdu zuen. Bestaldekik, aurreko atalean ikusi genuen bezala, 1993. urtetik aurrera izandako joera aldaketak masa galera esanguratsua suposatu zuen bigarren periodorako. Hortaz, periodo honetako gainazalaren energia altuagoa izan beharko litzateke. Gure emaitzek, ordea, ez dute berdina esaten. Izan ere, lehenengo periodoko energia-fluxuaren batezbestekoa $-1,5 \pm 1,2 [W/m^2]$ -koa izan zen bigarren periodokoa $-1,6 \pm 0,7 [W/m^2]$ -koa izan zen bitartean.

Taula 4.2: Periodo desberdinetako EB-aren aldagaien batezbestekoak [W/m^2]-etan, euren errore estandarrekin. (SW) eguzki-erradiazioa da, (LW) lurreko erradiazioa eta (SH) bero sentikorra eta (LH) bero sorra.

	SW	LW	SH	LH	E_{tot}
1980-2018	$29,5 \pm 2,3$	$-46,6 \pm 0,1$	$17,4 \pm 0,6$	$-2,5 \pm 0,2$	$-1,6 \pm 0,7$
1980-1992	$30,1 \pm 3,3$	$-46,7 \pm 0,8$	$17,6 \pm 1,1$	$-2,5 \pm 0,3$	$-1,5 \pm 1,2$
1993-2018	$29,5 \pm 2,3$	$-46,6 \pm 0,6$	$17,7 \pm 0,7$	$-2,2 \pm 0,2$	$-1,7 \pm 0,9$

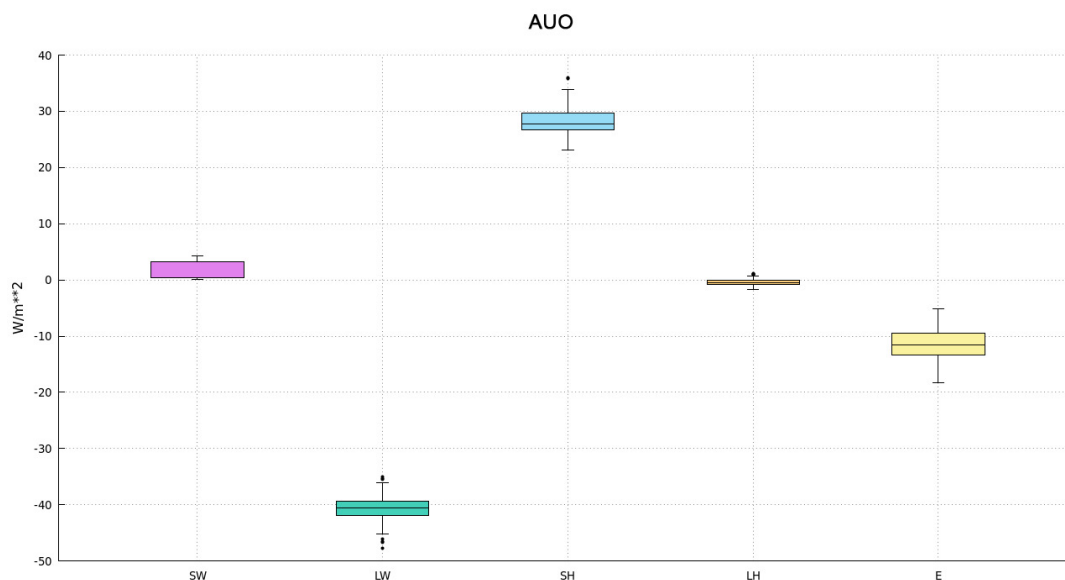
Bestaldetik, urte bakarreko balatzeak aztertu eta gero bost fluxuen artean bi nagusitzen direla ondorioztatu dugu. Alde batetik, eguzkitik datorren erradiazioa eta bestaldetik gainazalak igortzen duen erradiazioa. Lehenengoak, ekainean, uztailan eta abuztuan ditu balio maximoak. Bigarrenak berriz, abenduan, urtarrilean eta otsailean. Hortaz, urteko 2 estazio esanguragarri bereizten dira.

Udako fenomenoak, egunen iraupenarekin dago lotuta bereziki. Izan ere, udako hilabeteetan egunak 24h-koak izatera heltzen dira ekainean. Hortaz, gainazalak egun osoan zehar jasotzen du eguzkiaren erradiazioa. Horren ondorioz, izotzaren urtzea areagotu egiten da. Gainera, (4.7) grafikoan ikusten den moduan, bero sentikorraren fluxuak balio positibo baxua hartzen du urteko hilabete hauetan. Izatez, bero sentikorrak gainazalaren eta atmosferaren arteko bero fluxua neurtzen du temperatura aldaketaren ondorioz. Hortaz, urteko hilabete hauetan gainazalaren eta atmosferaren temperaturen diferentzia ez da oso esanguratsua. Are gehiago, udako tenperaturak urteko altuenak direla jakinik, gainazaleko tenperatura asko igotzen dela ondorioztatu dezakegu (maximoa $0^{\circ}C$ izanik guneez izotzuetarako).



Irudia 4.7: Ekaineko, uztailako eta abuztuko energia balantzearen aldagaien batezbestekoak 1980-2018 periodoan zehar.

Bestaldetik, neguko hilabeteetan guztiz kontrakoa gertatzen da. Egunen iraupenaren murrizpenaren ondorioz eguzki ordu gutxi daude. Hortaz, gainazalak energia gehiago galtzen du irabazten duena baino. Hau da, eguzkiko erradiazioaren eta lurreko erradiazio netoaren diferentzia oso negatiboa da. Gainera, aurreko kasuan ez bezala bero sentikorrak balio oso altua dauka. Hots, gainazalak atmosfera baino askoz tenperatura baxuagoa du. Laburbilduz: neguan zehar, izotza-
ren urtzerako erabiltzen den energia kantitatea modu esanguratsuan txikiagotzen da udakoarekin alderatuz.



Irudia 4.8: Abenduko, urtarrileko eta otsaileko energia balantzearen aldagaien batezbestekoak 1980-2018 periodoan zehar.

Garapen espaziala.

Aurreko ataleko (5.1) taulan ikusi dugun bezala, lau aldagaietatik bik ekarpen negatiboa egiten diote lurreko gainazalari. Bestaldetik, (4.13) irudietan ikusi daitekenez bai lehenengo periodoan eta bai bigarrenean ekarpen positiboak barnealdeko guneetan eman ziren gehien bat. Bestaldetik, kostaldera hurbildu ahala eguzki-erradiazioaren eta bero sentikorraren fluxuak nabarmendu egin ziren bi periodoetan (4.10, 4.9). Hortaz, kostaldeko guneetan gainazalak energia gehiago irabazi zuen galdu zuena baino.

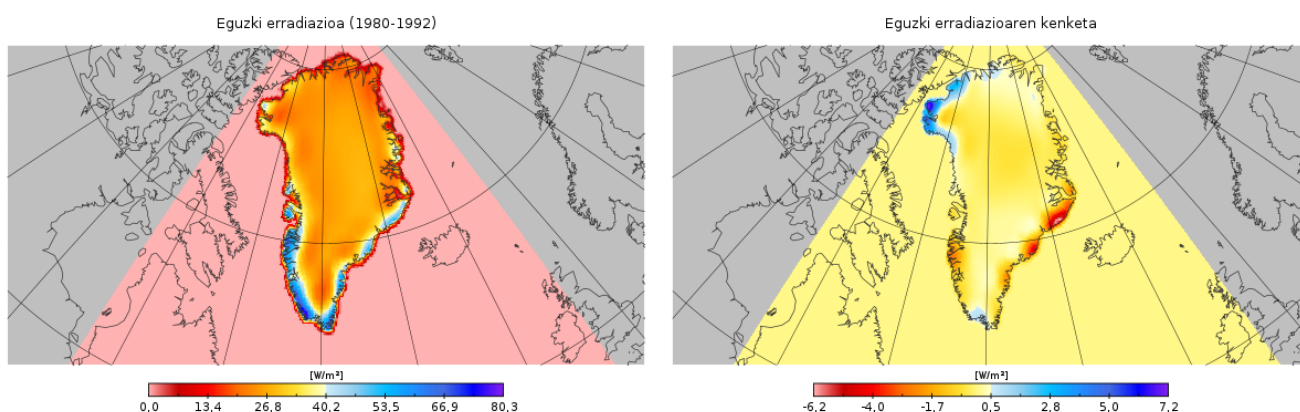
Esan bezala, eguzki-erradiazio netoaren balioak positiboagoak izan ziren kostaleko zonaldeetan. Honek informazio interesgarria ematen digu lurralde bakoitzaren gainazalari buruz. Izan ere, izotzaz edo elurraz eztaletako gainazalak albedo¹ handiagoa daukate izotz gabekoak baino. Hortaz, esan dezakegu hego-ekialdeko eta gehien bat hego-mendebaldeko kostaldek izotz gabeko edo izotz beltzaz estalitako zonaldeak direla.

Lurrak igorritako fluxua, bestaldetik, modu uniformean banatu zen bi periodoetan zehar. Horre-

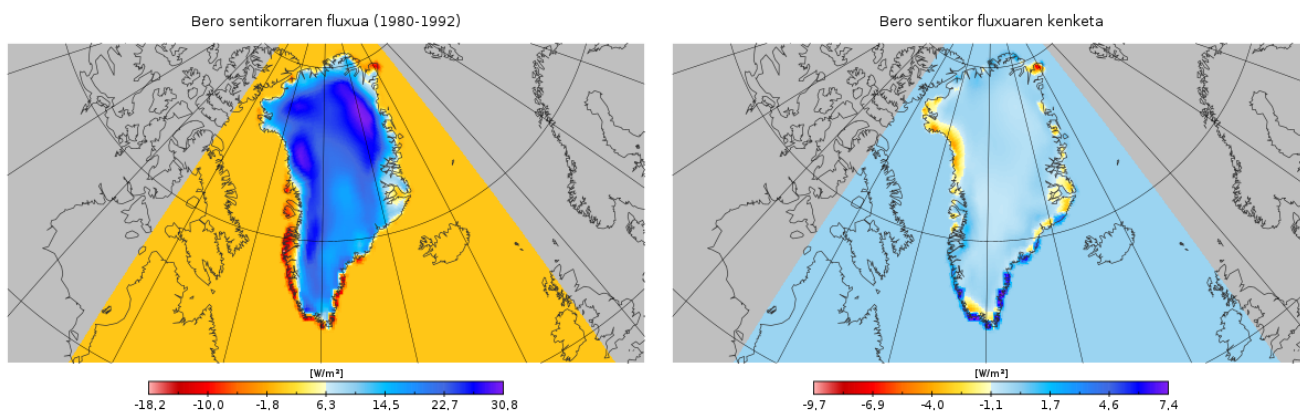
¹Gainazalek islatzen duten eguzki erradiazioaren frakzioa. Hau da: $|SW_{islat.}|/SW_{iritsi}$ [18]. Groenladiako albedoaren eboluzioari buruzko informazioa aurkitu daiteke [19] artikuluan.

taz gain, bero sorraren balio negatiboenak hegoaldeko kostaldetan eman ziren. Hots, sublimazioa edo lurruntzea kostaldeko zonaldeetan eman zen gehien bat (4.12). Emaitza hauek (4.4) grafi-koarekin guztiz bateragarriak dira. Izan ere, gauza bera adierazten dute ikuspuntu desberdinak erabiliz.

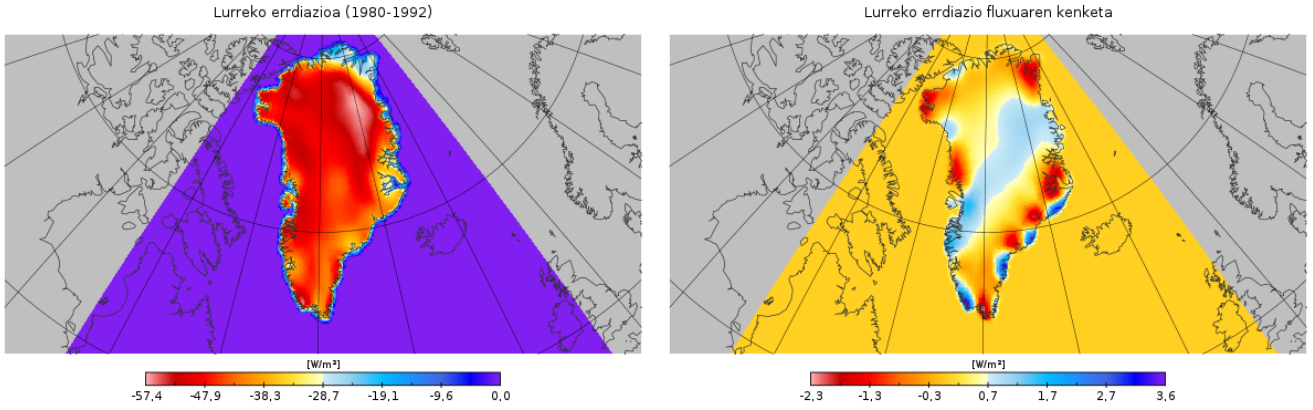
Azkenik, lehenengo periodoko balioak eta bigarren periodokoak konparatzen ditugunean, nahiz eta aldaketa txikiak izan, orokorrean ekarpen positiboek beherakada bat izan zutela ikus daiteke 1993. urtetik urrera. Gainera, (4.13) irudian ikus daiken moduan, hegoaldeko zonalde batzuk ezik orokorrean Groenlandia osoan batezbesteko energia positiboagoa izan zen 1. periodoan zehar. Beraz, lortutako emaitzak aurreko atalean lortutakoekin bateragarriak izateko ikerketa gehiago behar da. Faktore asko daude eta batenbat eskapatzen ari zaigulakoan nago.



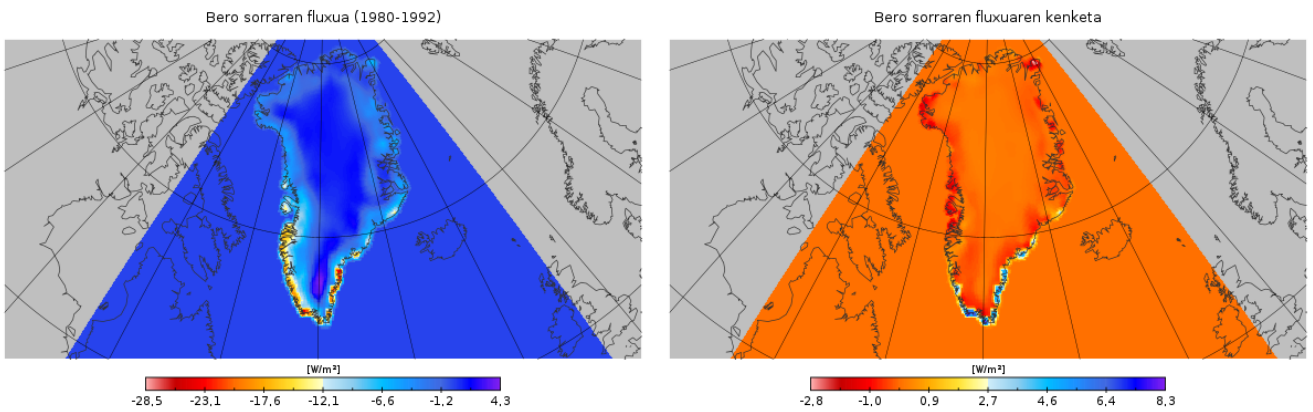
Irudia 4.9: Ezkerrean 1980-1992 periodoko eguzki-erradiazioaren batezbestekoa. Eskuinean 1980-1992 minus 1993-2018 periodoetako balioak.



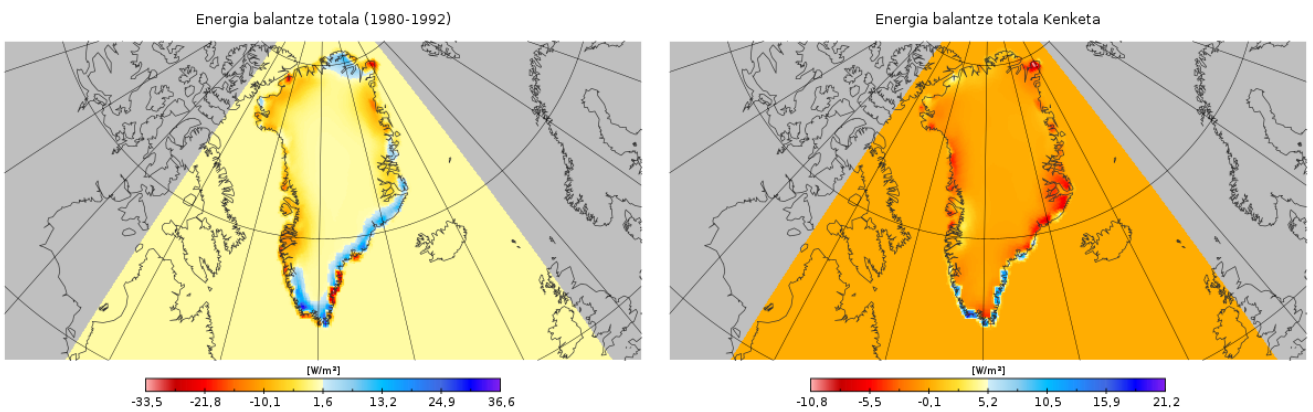
Irudia 4.10: Ezkerrean 1980-1992 periodoko bero sentikorraren batezbestekoa. Eskuinean 1980-1992 minus 1993-2018 periodoetako balioak.



Irudia 4.11: Ezkerrean 1980-1992 periodoko lurreko erradiazioaren batezbestekoa. Eskuinean 1980-1992 minus 1993-2018 periodoetako balioak.



Irudia 4.12: Ezkerrean 1980-1992 periodoko bero sorraren batezbestekoa. Eskuinean 1980-1992 minus 1993-2018 periodoetako balioak.



Irudia 4.13: Ezkerrean 1980-1992 periodoko energiaren balantze totalaren batezbestekoa. Eskuinean 1980-1992 minus 1993-2018 periodoetako balioak.

Kapitulua 5

Ondorioak

Gradu amaierako lanetik atera dezakegun lehenengo ondorioa da egindako ikerketa ez dela nahikoa Groenladiak galtzen duen masa totalaren estmazio on bat egiteko. Masaren galerak eta irabaziak eguratsaren aldagaien funtzioan neurtu ditugu eta ondorioz soilik gainazalak sufritu dituen aldaketak aztertu ditugu. Horregatik, 4. atalean lortutako balioek masa balantze positiboa eman digute, [10, 20] ikerketek negatiboa ematen duten bitartean. Laburbilduz, Groenlandia bezalako masa balantze totala kalkulatzeko ezinbestekoa da, alde batetik, gainazaleko balantzea kalkulatzeko (lan honetan egin dugun bezala) eta, bestaldetik, ablazio zonaldeko (kostaldeetako zonaldeak) glaziarren dinamika aztertzeko. Izan ere, hori da egungo ikerketa gehienek jarraitzen duten bidea. Hala ere, hori, GRAL honen helburutik kapo zegoen.

Bigarren ondorio bezala esan dezakegu gainazaleko masa balantzean lortutako balioak beste lanetan lortutakoekin alderatzea nahiko lan konplexua dela. Arrazoietakoa bat, ikerketek eredu atmosferiko desberdinak erabiltzen dituztela da. Gainera, eredu bakoitzetik lortutako datuak erresoluzio desberdinarekin egon daitezke definituta eta datu horiek azalera desberdinak estaltzen dituzten maskaretan egon daitezke banatuta. Beraz, ezaugarri hauek berdinak izan ezean, ezinezkoa da emaitzen artean zehaztasun handiko bateragarritasuna lortzea. Hau jakinik, antzerako maskarak erabili dituzten hiru artikulu aukeratu ditugu eta gure emaitzen antzeko balioak lortu direla ondorioztatu dugu. Izan ere, gure ikerketarekin alderatuta, 1992. urtetik aurrera Groenlandiaren gainazalaren masa galeraren joera beherakor bera ikus daiteke, honen arrazoi nagusia isurketaren batezbesteko hazkundea izanik [20, 21, 22]. Gainera, prezipitazio eta baporazio totala egonkor mantendu zenez masa galeraren eragile printzipala urtzea izan zela ondorioztatu dezakegu. Horretaz gain, gune kaltetuenak hegoaldekoak eta hego mendebaldekoak izan ziren.

Taula 5.1: Lan desberdinetako gainazaleko masa balantzearen balioak.

	Urte periodoa	Gainazaleko M.B.	Prezipitazioa	Isurketa
Van de Broeke et al.	1991-2015	306 ± 120	712 ± 70	363 ± 109
Fetewesi et al.	1980-2015	480 ± 87	711 ± 61	220 ± 52
Mottram et al.	1980-2014	360 ± 134	886 ± 70	446 ± 109
Lan honetan	1980-2014	289 ± 35	899 ± 27	546 ± 28

Bestaldetik, 4.2 atalean lortutako emaitzei dagokienez hainbat gauza ondorioztatu ditzakegu. Alde batetik, eguzki-erradiazioa masa galeraren arrazoi printzipala da (energia-fluxu positiboen baita). Gainera, balio maximoak udako urtaroetan gertatzen dira, minimoak negukoetan gertatzen diren bitartean. Horrez gain, bero sorraren fluxuaren batezbesteko balioa negatiboa izan zen bai lehenengo periodoan eta bai bigarrenean. Hots, lurrundutako edo sublimaturiko masa kantitatea kondentsatu zena baino handiagoa izan zen. Hala ere, lurra igorritako erradiazioa beste fluxuen gaintik ezarri zen (batezbestean) bi periodoetan zehar. Ondorioz, energiaren fluxu totala negatiboa dela ondorioztatu dugu. Beste modu baten esanda, Groenlandiako gainazalak energia galdu zuen bi periodoetan zehar; horrenbestez, hoztu egin zela esan dezakegu.

Balio hauek, ordea, ez dira alderagarriak 4.1 ataleko emaitzekin. Esan bezala, 1993. urtetik aurrera, masa galeraren arrazoi printzipala urtzea izan zen (isurketaren gorakada). Hala ere, energiaren atalean lortutako balioek guztiz kontrakoa esaten dute. Izan ere, lortutako emaitzen arabera, bigarren periodoan gainazalak energia galdu zuen lehengoarekin konparatuz. Jakinik masaren balantzearen ataleko emaitzak bateragarriak direla beste ikerketekin, esan dezakegu energiaren atalean lortutakoak ez dutela balio joera aldaketaren zergatia azaltzeko.

Alde batetik, pentsatu dezakegu, izandako errorea erresoluzio faltagatik izatea. Hala ere, [24] ikerketan 1980-1999 periodoko energiaren balantzea simulatzeko ERAinterim erabili zuten baita ere. Ikerketa horren arabera, Groenlandiako gainazalean ekarpen positiboak (eguzki-erradiazioa eta bero sentikorra) lurreko erradiazioa eta bero sorra baino altuagoak izan ziren. Hau da, batez besteko energia totala positiboa lortu zuten. Haatik, energia balantzearen aldagaiak urtze egunetan kontuan hartu zituzten soilik. Ikerketa honetan ordea, egun guztiak hartu ditugu kontuan. Horregatik, 4.2 ataleko balioak eta isurketaren balioak ez dira bateragarriak izan. Hortaz, soluzio bat izango litzateke egunez eguneko ikerketa egitea eta gainazaleko energia negatiboko egunak baztertzea.

Bibliografía

- [1] García, J. (2020). 5^o Informe del IPCC. La certeza de una herencia, el calentamiento global. Retrieved 7 June 2020, from http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_analisis/2013/DIEEEA51-2013.CertezaCalentamientoGlobal_IJGS.pdf
- [2] Hacia el apartheid climático. (2020). Retrieved 7 June 2020, from <https://news.un.org/es/story/2019/06/1458411>
- [3] Groenlandia se derrite por el calentamiento global. (2020). Retrieved 7 June 2020, from https://www.nationalgeographic.com.es/naturaleza/grandesreportajes/groenlandia-sederrite2_9765
- [4] Pagano, A., Durner, G., Rode, K., Atwood, T., Atkinson, S., and Peacock, E. et al. (2018). Highenergy, highfat lifestyle challenges an Arctic apex predator, the polar bear. *Science*, 359(6375), 568572. doi: 10.1126/science.aan8677
- [5] Ettema, J., van den Broeke, M., van Meijgaard, E., van de Berg, W., Bamber, J., Box, J., and Bales, R. (2009). Higher surface mass balance of the Greenland ice sheet revealed by highresolution climate modeling. *Geophysical Research Letters*, 36(12). doi: 10.1029/2009gl038110
- [6] Morlighem, M., Williams, C., Rignot, E., An, L., Arndt, J., and Bamber, J. et al. (2017). BedMachine v3: Complete Bed Topography and Ocean Bathymetry Mapping of Greenland From Multibeam Echo Sounding Combined With Mass Conservation. *Geophysical Research Letters*, 44(21), 11,05111,061. doi: 10.1002/2017gl074954
- [7] Shepherd, A., Ivins, E., A, G., Barletta, V., Bentley, M., and Bettadpur, S. et al. (2012). A Reconciled Estimate of IceSheet Mass Balance. *Science*, 338(6111), 11831189. doi: 10.1126/science.1228102
- [8] Santos Burguete, C. (2018). Física del caos en la predicción meteorológica.
- [9] L. Fu and A. Cazenave, *Satellite Altimetry And Earth Sciences* (Academic Press, 2000).
- [10] Shepherd, A., Ivins, E., Rignot, E. et al. (2019). Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018. *Nature*, 579(7798), 233-239. doi: 10.1038/s41586-01918552
- [11] Peixoto, J., and Oort, A. (1995). *Physics of climate*. New York: AIP, American Institute of Physics.

- [12] Lucarini, V., and Ragone, F. (2011). Energetics of climate models: Net energy balance and meridional enthalpy transport. *Reviews Of Geophysics*, 49(1). doi: 10.1029/2009rg000323
- [13] NetCDF: NetCDF Documentation. (2020). Retrieved 5 June 2020, from https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/netcdf_documentation.html
- [14] Berrisford, P., Dee, D., Fielding, K. et al. (2020). The ERAInterim archive. Retrieved 5 June 2020, from <https://www.ecmwf.int/en/elixir/8173erainterimarchive>
- [15] NASA GISS: Panoply 4 netCDF, HDF and GRIB Data Viewer. (2020). Retrieved 5 June 2020, from <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>
- [16] Schulzweida, U. (2020). Retrieved 5 June 2020, from <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/embedded/cdo.pdf>
- [17] Geography of Greenland. (2020). Retrieved 18 June 2020, from https://en.wikipedia.org/wiki/Geography_of_Greenland
- [18] Albedo - AMS Glossary. Retrieved 25 April 2012, from <http://glossary.ametsoc.org/wiki/Albedo>
- [19] Riihelä, A., King, M., and Anttila, K. (2019). The surface albedo of the Greenland Ice Sheet between 1982 and 2015 from the CLARA-A2 dataset and its relationship to the ice sheet's surface mass balance. *The Cryosphere*, 13(10), 2597-2614. doi: 10.5194/tc-13-2597-2019
- [20] Barletta, V., Sørensen, L., and Forsberg, R. (2013). Scatter of mass changes estimates at basin scale for Greenland and Antarctica. *The Cryosphere*, 7(5), 1411-1432. doi: 10.5194/tc-7-1411-2013
- [21] Noël, B., van de Berg, W., Machguth, H., Lhermitte, S., Howat, I., Fettweis, X., and van den Broeke, M. (2016). A daily, 1km resolution data set of downscaled Greenland ice sheet surface mass balance (1958-2015). *The Cryosphere*, 10(5), 2361-2377. doi: 10.5194/tc-10-2361-2016
- [22] Fettweis, X., Box, J., Agosta, C., Amory, C., Kittel, C., and Lang, C. et al. (2017). Reconstructions of the 1900–2015 Greenland ice sheet surface mass balance using the regional climate MAR model. *The Cryosphere*, 11(2), 1015-1033. doi: 10.5194/tc-11-1015-2017
- [23] Mottram, R., Fredrik, B., Peter lang, L. and Shutting, Y. et al. (2017). Surface Mass balance of the Greenland ice Sheet in the Regional Climate Model HIRHAM5: Present State and Future Prospects. doi: 10.14943/lowtemsci.75.105
- [24] Franco, B., Fettweis, X., and Erpicum, M. (2013). Future projections of the Greenland ice sheet energy balance driving the surface melt. *The Cryosphere*, 7(1), 118. doi: 10.5194/tc-7-118-2013