



LAS NÉOUS GLAZIARRAREN BILAKAERA (BALAITOUS, FRANTZIA), IZOTZ GARAI TXIKITIK GAUR EGUN ARTE

Irazu Aranburu Antxia

Ingurumen-Zientzietako gradua 2022 - 2023

4. Maila, Gradu Amaierako Lana

AURKIBIDEA:

Laburpena:	3
1. Sarrera:	3
2. Helburuak:	7
3. Garapena:	7
3.1. Ikerketa eremua:.....	7
3.2. Metodologia:.....	11
3.3. Emaitzak:.....	11
3.4. Eztabaida:.....	18
4. Ondorioak:	21
Bibliografia:	22

Laburpena:

Las Néous glaziarraren (Balaitous mendigunea, Pirinioetako Parke Nazionala Frantzian) bilakaera ikertu da lehen aldiz lan honetan, Izotz Garai Txikitik (LIA) gaur egun arte. Glaziarrak izan duen hedadura kartografiatu da, metaketa morrenikoak, argazki historikoak zein ortofotodunak erabiliz. Glaziarrak jasan duen atzerakada nabarmena izan da, bere hedadura maximotik (51,4 ha) azaleraren %95,4 galdu duelarik, gaur egun soilik 2,36 ha izanik. Izotz galeraren-tasa aldatzen joan da denboran zehar, glaziarrean hainbat fase ezberdinduz: 1. *Izotz Garai Txikiko glaziarraren maximoa*; 2. *19. mendeko aurrerakada*; 3. *Glaziarraren atzerakada*; 4. *Glaziar oreka*; 5. *Etengabeko atzerakada*; 6. *Atzerakada drastikoa*. Glaziarrak jasan dituen fase hauek serie klimatikoekin zein Pirinioetako beste glaziar batzuekin (La Paul eta Maladeta) alderatu dira, denen artean parekotasun oso altua aurkitu delarik. Horrela beraz, Las Néous glaziarraren bilakaera bat dator Pirinioetako beste glaziar alpetar batzuetan ikusitako joerekin; izan ere, XIX. eta XX. mendeetan Glaziarren Oreka-Lerroak etengabe handitu dira, bai eta masaren balantze-aldi negatibo eta luzeak ere. Honek agerian uzten du Pirinioetako glaziarrek duten erantzun oso azkarra baldintza klimatikoen aldaketan aurrean, Pirinioetako glaziarrak aldaketa globalaren geoindikatzailerik sentikorrenak direla nabarmenduz.

Resumen:

En este trabajo se ha investigado por primera vez la evolución del glaciar Las Néous (macizo de Balaitous, Parque Nacional de los Pirineos en Francia), desde la Pequeña Edad de Hielo (LIA) hasta la actualidad. Se ha cartografiado su extensión en el glaciar, utilizando depósitos morrénicos, fotografías históricas y ortofotos. El retroceso que ha sufrido el glaciar ha sido notable, perdiendo desde su extensión máxima (51,4 ha) el 95,4% de su superficie, y tan sólo cuenta con 2,36 ha en la actualidad. La tasa de pérdida de hielo ha ido variando a lo largo del tiempo, diferenciando el glaciar en varias fases: 1. *Máximo del glaciar de la Pequeña Edad del Hielo*; 2. *Avance del siglo 19*; 3. *Retroceso del glaciar*; 4. *Equilibrio glaciar*; 5. *Retroceso continuo*; 6. *Retroceso drástico*. Estas fases que ha sufrido el glaciar se han comparado tanto con las series climáticas como con otros glaciares pirenaicos (La Paul y Maladeta), encontrándose entre todos una paridad muy alta. Así pues, la evolución del glaciar Las Néous coincide con las tendencias observadas en otros glaciares alpinos pirenaicos, ya que en los siglos XIX y XX las Líneas de Equilibrio Glaciar no han dejado de aumentar, así como los periodos de balance negativos y prolongados de la masa. Esto pone de manifiesto la rápida respuesta de los glaciares pirenaicos a los cambios en las condiciones climáticas, destacando que los glaciares pirenaicos son geoindicadores sensibles del cambio global.

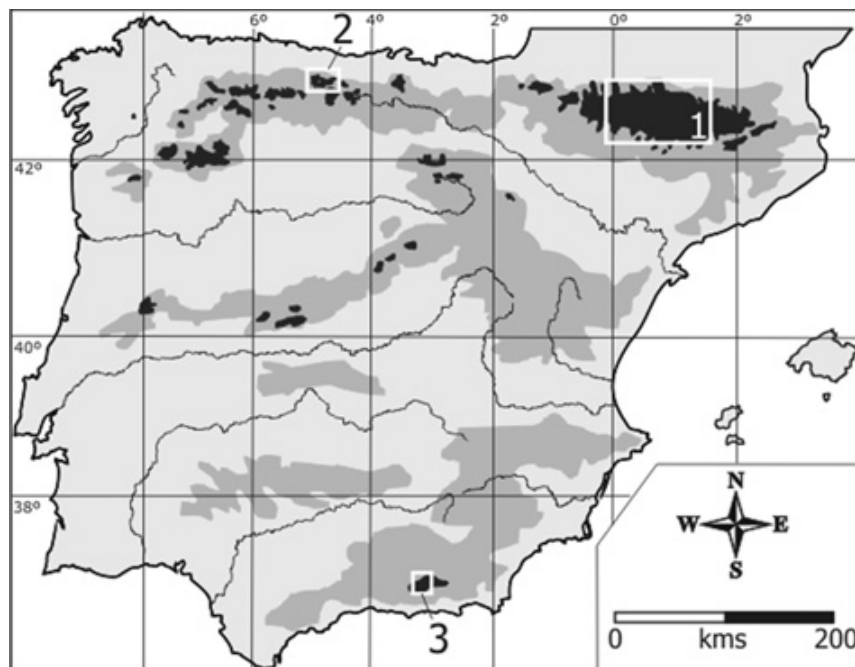
Abstract:

In this work, the evolution of Las Néous glacier (Balaitous massif, Pyrenees National Park in France) has been investigated for the first time, from the Little Ice Age (LIA) to the present. Its extent on the glacier has been mapped using moraine deposits, historical photographs and orthophotos. The retreat suffered by the glacier has been notable, losing 95.4% of its surface from its maximum extension (51,4 ha), and it currently only has 2,36 ha. The rate of ice loss has varied over time, differentiating the glacier into several phases: *1. Maximum of the Little Ice Age; 2. 19th century advance; 3. Retreat of the glacier; 4. Glacier balance; 5. Continuous retreat; 6. Drastic retreat.* These phases that the glacier has undergone have been compared both with the climatic series and with other Pyrenean glaciers (La Paul and Maladeta), finding very high parity among all of them. Thus, the evolution of Las Néous glacier coincides with the trends observed in other Pyrenean alpine glaciers, since in the 19th and 20th centuries the Equilibrium Line Altitude have not stopped increasing, as well as prolonged periods of negative mass balance. This stands out the rapid response of Pyrenean glaciers to changes in climatic conditions, highlighting that Pyrenean glaciers are sensitive geoindicators of global change.

1. Sarrera:

Izotz Garai Txikia (LIA), gaur egun bizi dugun berotze globala baino aurreko azken aldi klimatiko hotzari egiten dio erreferentzia, non garai hau XIV. mendetik XIX. menderarte luzatzen den (González-Trueba et al., 2008). Garai honetan eman ziren baldintza klimatikoek, neguko elurteen eta udako prezipitazioen ugaritzea zein temperaturen jaitsierak (unerik hotzenetan, eremu batzuetan 2°C-koa izatera ere iritsi zena), urteko masa balantzea positiboa izatea ahalbidetu zuten, glaziatutako eremuetan aurkitzen ziren glaziarren aurrerapena emanez (González-Trueba et al., 2005).

Garai honetan zehar Iberiar Penintsulan glaziarrek hiru puntutan agertzen ziren, Pirinioetan, Europako mendietan eta Sierra Nevada (ikus 1. irudia) (González-Trueba et al., 2008), eta gaur egun soilik Pirineoetan aurkitzen dira (Rico et al., 2013). Pirinioetako glaziar hauek Europan hegoalderago dauden izotz masak dira. Azken hamarkadetan (XXI. mendean bereziki) hauen egoera eta dinamika ulertzeko ikerketen areagotzeak gaur egungo glaziarren dinamikaren ezagutza hobetu duen arren, glaziar hauen bilakaera Izotz Garai Txikian eta bereziki, hau eta gero (XIX. mendearen erdialdetik aurrera eta XX. mendean), ez dago guztiz ikertuta, eta bakarrik Pirinioetako 21 glaziarretatik (Vidaller et al., 2021) gutxi batzuetan egin dira ikerketak (Maladeta, La Paul, Ossoue eta Infiernos glaziarretan).

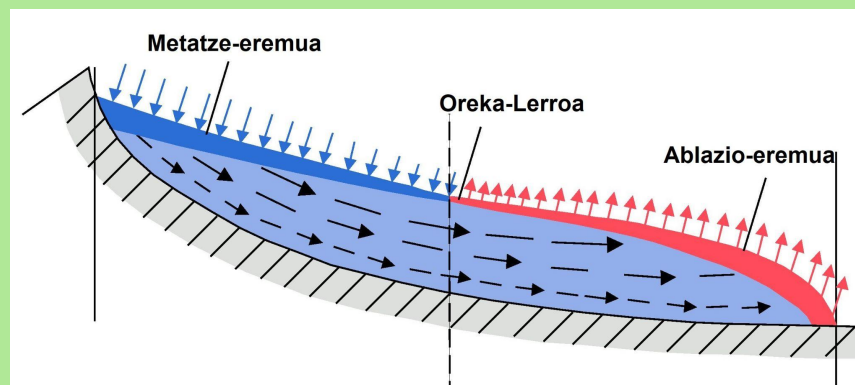


1.-Irudia: Izotz Garai Txikian glaziatutako mendien kokapena Iberiar Penintsulan. 1, Pirinioak; 2, Europako mendiak; 3, Sierra Nevada. Kolore beltzak glaziatutako eremuak adierazten ditu Pleistozenoko glaziazioetan (González-Trueba et al., 2008).

Glaziarrek izotzez osaturiko masak dira, non ur solidoa (elurra, kazkabarra edo antzigarra) izotz bilakatu eta glaziarraren parte bihurtzen den, eta lurrun (lurrunketa edo sublimazio bidez) edo forma likidoan izotza galtzen duena (Francou eta Pouyaud, 2008).

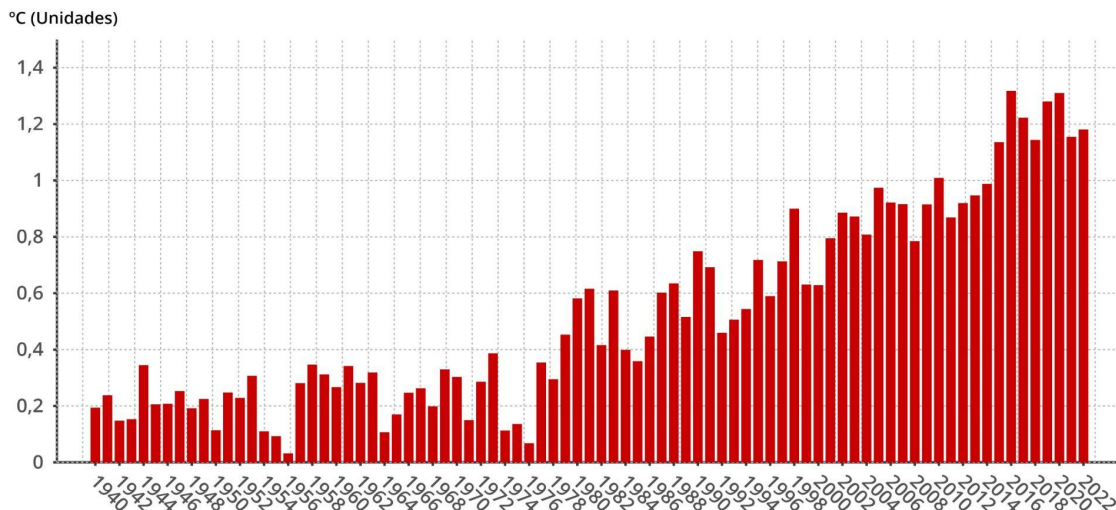
Glaziar baten bilakaera bi aldagairekin neurtu daiteke, alde batetik, izotz edo masa-irabazia (sarrerak edo input), eta bestetik, masa-galera (output). Bi aldagai hauen arteko erlazioari Urteko Masa Balantzea (AMB) deritza (Rubial, 2005). Beraz, balantze hori positiboa edo negatiboa izateak glaziarra handitzen edo txikitzen dagoela adierazten du.

Glaziarraren goiko aldeetan (metatze-eremua) ematen den balantze positiboak, izotz-fluxuak sortzen ditu behealderantz (ablazio-eremua) (ikus 2. irudia). Prozesu hau, izotza, ikuspuntu mekanikotik, gorputz bisoplastiko bat bezala jokatu duelako gertatzen da, bere pisuaren ondorioz deformatzen dena, aipatutako mugimendua eraginez (Francou eta Pouyaud, 2008).



2.-Irudia: Glaziarraren dinamika (Aschwanden, 2014).

Glaziarrek jasan duten atzerakada hau, batez ere azken 100-150 urteetan, jatorri antropikoko berotegi-efektuko gasek eragindako klima aldaketan du jatorria probabilitate handiarekin (Solomina et al., 2016). Izan ere, temperatura globalari erreparatzen badiogu, ikus genezake temperatura batez beste $0,5^{\circ}\text{C}$ igo dela 1961-1990 artean (Caballero et al., 2007) eta igoera hori $1,1^{\circ}\text{C}$ -koa izatera heldu da 2011-2020 artean mendearen bigarren erdiarekin (1850-1900) alderatuz gero (ikus 3. irudia) (IPCC, 2023). Aipatzekoa da Pirinioetan eman den temperaturen gorakada mundu-mailan eman dena baino handiagoa izan dela, $1,2-1,5^{\circ}\text{C}$ -koa izan delarik (OPCC, 2018).



3.Irudia: Temperatures gorakada maila globalean, 1850-1900 tartearakin alderatuz (Iturria: Copernicus).

Serie klimatikoaren eskasiaren ondorioz, bereziki garaiko altueretan, klimaren proxy-erregistroak erabilgarriak dira klimaren iragana osatzeko eta fluktuazioak eskala sekularrean zehazteko. Horregatik, glaziarrek, klimaren proxy sendoak dira (WGMS, 2008) eta glaziar bilakaeraren berreraikitzeak independentzia handiagoa eman dezake klima aldatzen ari den ebidentziari (Martí et al., 2015).

Glaziarren atzerakadak eragin eta inpaktu ezberdinak izango ditu, horien artean, ondorengoak daude:

- **Itsas-mailaren gorakada:** Glaziarren urtzeak 2,7 zentimetroko itsas mailaren gorakada eragin du 1865-1990 tartean (Zuo eta Oerlemans, 1997).
- **Ur gezaren galera:** Gizakiok kontsumitzen dugun uraren %50-a mendentan du jatorria (Liniger et al., 1998), glaziarren desagertzeak eskuragarri izango dugun ur kopuruan murrizketa bat suposatuko duelarik.
- **Mendiko hidrologian eraldaketa:** Glaziarren atzerakadak eta horiekin lotutako ur-fluxuaren aldaketek uraren kalitateari eragin diezaiokete, solutuen diluzioa murrizten, sedimentuen karga gutxitzen eta korrontearen tenperatura handitzen (Fleming eta Clarke, 2003; Hood eta Berner, 2009; Moore et al., 2009).
- **Biodibertsitatearen galera:** Glaziarren desagertzeak eskualdeko habitataren heterogeneotasuna gutxitzea ekarriko du eremuko erreketan. Izan ere, barne-heterogeneotasunak zein glaziarrek eragindako korronteen arteko isolamendu espazialak, erreketan bizi diren organismoen beta aniztasuna hobetu dezakete (Finn et al., 2013).

Pirinioetako glaziarrek garrantzi handikoak dira hainbat arrazoiengatik: Pirinioetako eskualdearen geoindikatzailerik apartak dira (Grunewald eta Scheithauer, 2010), mendiko ekosistemen elementuak dira (Finn et al., 2013), arrisku natural ezberdinen eragile eta goi-mendiko paisaiaren elementu ikonikoak dira eta turismoaren eta ekosistema zerbitzu kulturalen parte dira besteak beste (OPCC, 2018).

Pirinioetako glaziarrek jasan duten atzerakada nabarmena izan da Izotz Garai Txikitik gaur egun arte. 1850. urtetik 1984-ra Pirinioetan aurkitzen zen glaziarren azalera 2060 ha izatetik 810,3 ha izatera pasa zen (%60,7ko galera), eta 2016-an soilik 242,0 ha aurkitzen ziren (%88,3ko galera 1.850en aldean), eta glaziarren kopurua, ondorioz, murriztu egin da, 52tik (1850ean) 39ra (1984) eta 19ra (2016) (Rico et al., 2017).

Beraz, Pirinioetako glaziarren bilakaera ezagutzeak Izotz Garai Txikiaren amaieratik, gaur egun arte, klima eta glaziarren arteko erlazioa ulertzen hobetzeko balio du. Izotz Garai Txikiaren amaieratik (XIX. mendearen erdialdean) XX. menderarte glaziarrek izan duten azalera aldaketak neurtuz fase ezberdinak zehaztu daitezke, eta hauek denbora serie klimatikoekin lotu.

Ondorioz, glaziar hauen bilakaera ulertzeak, gaur egungo egoera eta etorkizun hurbilean izan dezaketen joera argitzen lagunduko du.

Las Neus glaziarra, Balaitous (3.144m) mendiaren ipar-ekialdean kokatzen da. Izotz masa honen bilakaera eta klimarekiko erantzunak ez ditu ikerketa ugari jaso, eta glaziarren bilakaerari buruzko informazioa dokumentu historiko, argazki edo eta erlazioz gabeko garai ezberdinetako dokumentuetan topatzen da. Horretaz gain, glaziarrek Izotz Garai Txikian sortutako metaketa morrenikoak bakarrik lan batzuetan aipatu dira, baina beraien kokapena eta hedadura ez dira orain arte zehaztu. Lan honetan glaziar honek jasan duen eboluzioa eta gaur egungo dinamika aztertuko da. Ikuspuntu nagusia eraldaketa morfodinamikoan egongo da ezarrita, Izotz Garai Txikitik orainaldira, jasan duen aldaketa hori aldaketa klimatikoarekin eta Pirinioetako beste glaziar batzuekin erlazionatuz.

2. Helburuak:

Gradu amaierako lan honen helburuak hurrengoak dira:

- Las Néous glaziarrek Izotz Garai Txikian izan zuen hedadura maximoa zehaztea, ortoirudi eta Geografia Informazio Sistemaz (GIS) baliatuz.
- Izotz Garai Txikitik gaur egun arte glaziarrek jasan duen eboluzioa zehaztea, pairatu dituen fase ezberdinak bananduz.

- Las Neus glaziarraren bilakaeraren faseak serie klimatikoekin eta beste glaziarren faseekin alderatzea, Pirinioetako eskualdean dagoen klima eta glaziarren bilakaerari buruzko ezagutza hobetzeko.

3. Garapena:

3.1. Ikerketa eremua:

Balaitus mendigunea 3.000 m baino gehiagoko mediak hartzen dituen mendebaldeko Pirinioetako lehen mendikatea da (Balaitus, 3.144 m; Fondiellas NE, 3.071 m; Fondiellas SO, 3.001 m). Espainiaren (Tena bailara) eta Frantziaren (Val d'Azun bailara) mugen artean kokatzen dena, Pirinio Garaiko (Okzitaniako eskualdea) eta Pirinio Atlantikoko (Akitania Berriko eskualdea) departamenduetan, alde frantsesean, eta Huescako probintzian (Aragoiko Autonomia Erkidegoa), alde espainiarrean (Julián et al., 2004).

Balaitus mendigunea babestutako eremua da, Pirinioetako Parke Nazionalaren baitan aurkitzen delarik mendigunearen Frantziako aldean, Espainiako aldean, aldiz, Ordesa-Viñamala Biosfera Erreserbaren baitan dago. Frantziako Pirinioen erdialdean dago kokatuta Parke Nazional hau, Pirinio Garaietako eta Pirinio Atlantikoetako departamenduetan. Mendikatearen iparraldeko isurialdeko tontorrak, zirku glaziarrak eta ingurumen-interes handieneko haranak babesten ditu, eta Espainiarekin muga egiten du. Mendebaldeko eta ipar-mendebaldeko haize nagusien eraginpean dago, eta ur-aberastasun handiak ditu: 230 mendiko aintzira eta ehunka kilometro ibai ditu bere baitan. Flora oso aberatsa da endemismoetan, 400 espezie inguru direlarik. Faunari dagokionez, animalia-espezie babestuen artean, Arrano beltza, putrea, Pirinioetako sarrinoa, Pirinioetako marmota eta Europako hartz arrea nabarmentzen dira (Tribot-Laspierre, 1992).

Mendigune hau granitikoa da, mendigune garaiez inguratuta, eta ondoko gailurrekin lotzen da gailur-lerro zorrotzen bitartez. Gailurren inguruan dozena bat zirku daude, Izotz Garai Txikiko aztarna morfologikoekin. Aldi honetako aztarna nagusiak iparraldeko orientazioak dituzten zirkuetan daude (Las Néous, Pabat, Arraille, Batcrabere, Frondellas), maximo historikoan, mendiguneko glaziarrak zabalena, Las Néous glaziarra, 2.300 m-ko altituderaino zabaltzen zen, eta 2.650/2.700 m-ra Frondellasen. Hegoaldean, Latour Arraileko glaziarra 2.800 m-ra iritsi zen, eta Frondellaseko gailurretan metaketak daude. Gaur egun glaziar bakarra dago (Las Néous) eta Pabat eta Frondellasen neurri txikiko izotz masa bat ageri da (González-Trueba *et al.*, 2005), azken hau izoztegi gisa sailkatuta dagoelarik. Las Néous glaziarra mendigunearen ipar-ekialdean aurkitzen da, Frantziako aldean, Val d'Azun

bailaran. Las Néous glaziarrek Balaitous erreka elikatzen du, Tuts aintzirarekin batera, non erreka honen urak Gave d'Arrens ibaira isurtzen diren.

Glaziar hau aurkitzen den eremua material morrenikoz osatuta dago. Till glaziarra eta hartxingadiak direlarik nagusi; izan ere, glaziar horiek desagertzearen edo atzeratzearen ondorioz, glaziarren inguruan metatu ziren hondakin sedimentarioak depositatzen joan dira. Era berean, material gehiago ere ikus daitezke, hala nola harri langarreztatutak (*Roche moutonne*). Gainera, kubeta glaziar ugari daude (Bello, 2017).

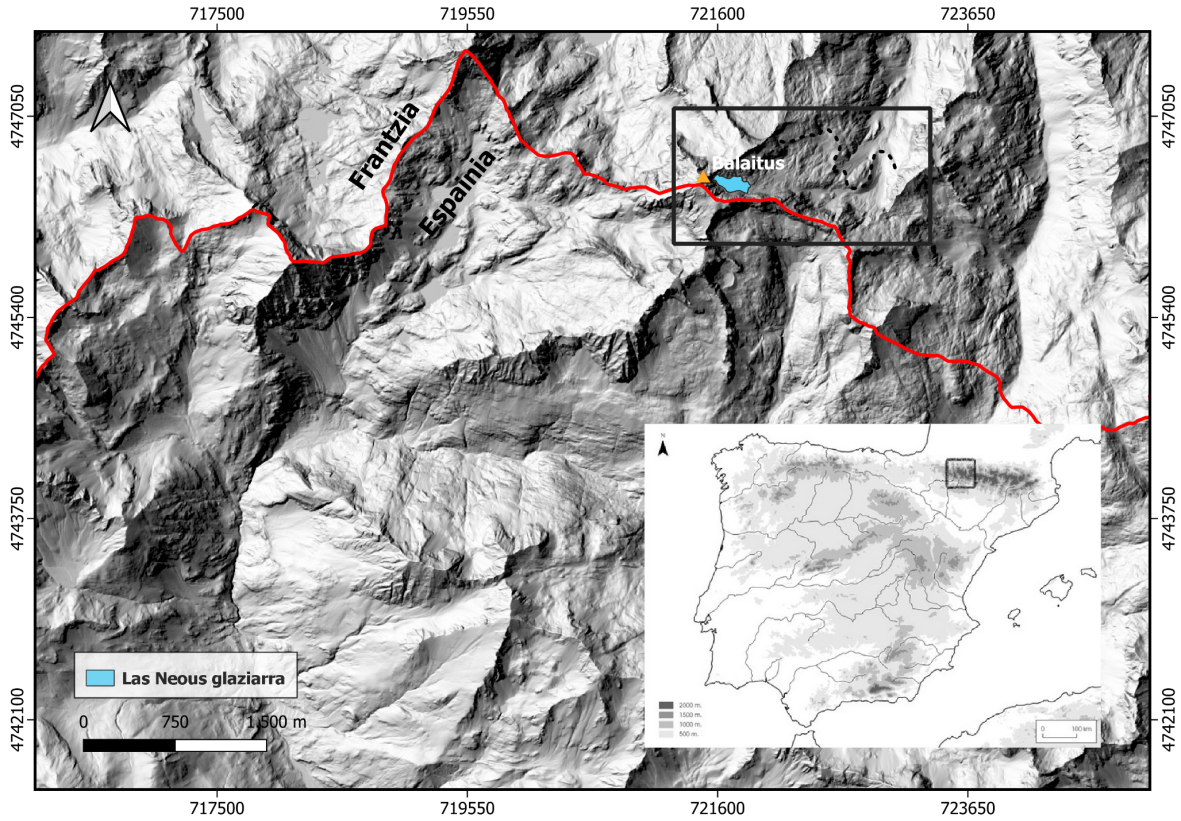
Izotz masa galera handiak eman dira azken urteetan, beheko aldean nagusi den lodiera galduz eta glaziarren malda handituz (René, 2016). Honen erantzule nagusia baldintza klimatikoak dira, non temperaturen gorakadak eragin duten elur prezipitazioaren urritzeak, glaziarren elikadura-iturria murriztu duelarik. Glaziarra beraz, desoreka handi batean aurkitzen da egungo baldintza klimatikoekiko.

Aipatzekoa da Las Néous glaziarra, Pirinioetako gainontzeko glaziarren bezala, Izotz Garai Txikian zehar garatu zela (González-Trueba et al., 2008), ondorioz, gaur egun gelditzen den glaziarren zatia, hein handi batean, garai horretako herentzia dela esan genezake.

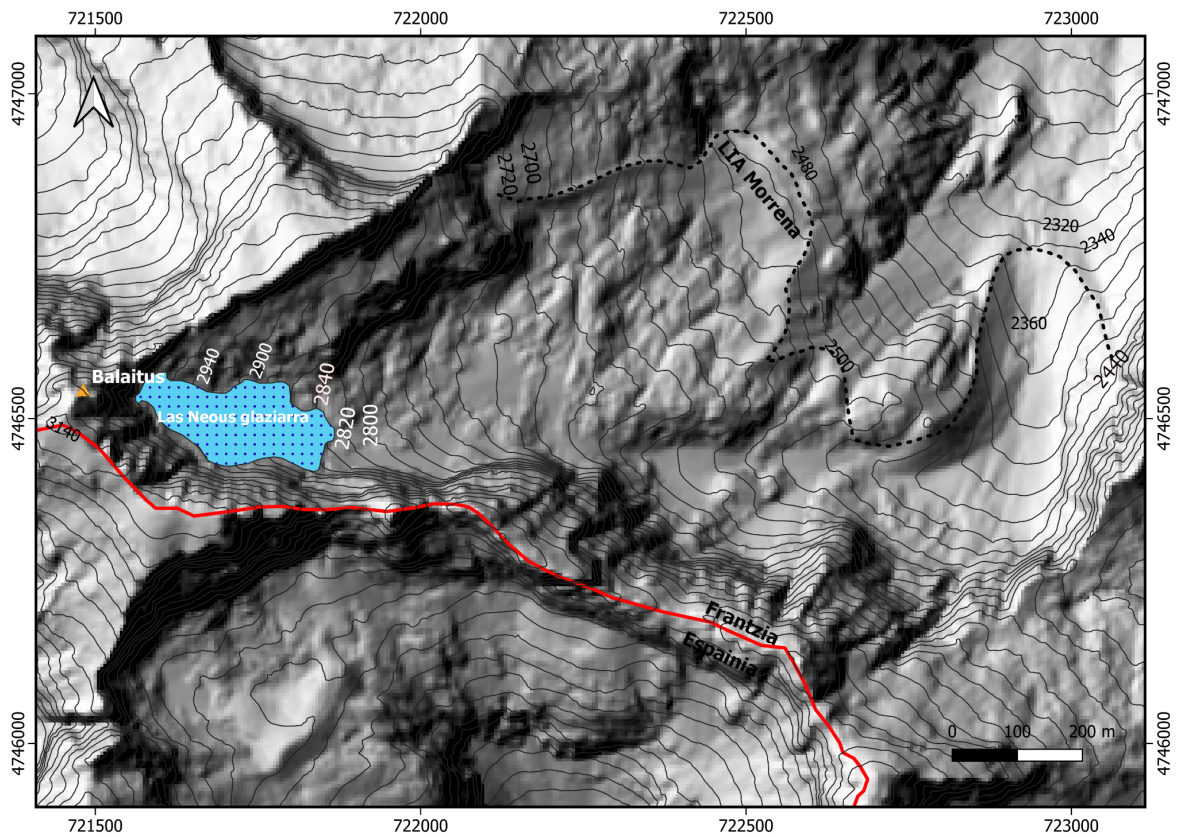
Gaur egun glaziarren metatze-eremuaren goiko aldea 3028 m-ko altitudetan dago kokaturik, eta aurrealdea 2828 m-ko altitudetan.



4.Irudia: Las Néous glaziarra 2022. urtean (Izagirre, 2022).



5.a-Irudia: Las Néous glaziarraren kokapen orokorra (Iturria: LIDAR-a CNIG eta elaborazio propioa).



5.b-Irudia: Las Néous glaziarraren kokapena Balaitus mendigunean eta hedadura 2022-an (Iturria: LIDAR-a CNIG eta elaborazio propioa).

3.2. Metodologia:

Lan hau aurrera eramateko, Las Néous glaziarraren eboluzioa zehazteko alegia, aurretik iada bilduta dauden datu geomorfologiko zein historikoetan analisi bat burutu da. Horretarako, Izotz Garai Txikiko glaziarren inguruko dokumentuak bildu dira (argazkiak, ortoargazkiak, irudi satelitalak zein idatzizko informazioa), bai gaur egungokoak zein historikoak. Zehazki Izotz Garai Txikian glaziarrak sortutako metaketa morrenikoak erabili dira abiapuntu moduan, glaziarraren hedadura neurtzeko. Metaketa hauen adina erlatiboki inferitu egin da hainbat lanetan, Pirinioetako glaziarraren zehaztutako Izotz Garai Txikiko materialen kokapena kontuan hartuz (González-Trueba et al., 2008). Izotz Garai Txikiaren amaieratik (XIX. mendearen erdialdean) aurrera glaziarraren azaleraren hedadura argazki historiko, dokumentu historiko, ortoargazkien bidez egin da, informazioa Geografia Informazio Sistema batean sartuz eta azalera hektareetan kuantifikatuz. Eskuratutako informazio honen bitartez Las Néous glaziarrak izan duen bilakaera berreraiki da, honek Izotz Garai Txikian izan zuen hedadura maximoa zehaztuz eta hortik aurrera pairatu dituen faseak ezberdinduz.

- Bibliografia espezializatuaren berrikuspena.
- Ortoargazkien bilaketa.
- Argazki historikoen bilaketa.
- Geomorfologia glaziarraren aztarnen kartografia GIS eta irudi satelitalen bidez.
- Glaziarraren hedadura zehaztea eta azalaren kalkulua GIS-ak erabiliz.
- Glaziarraren bilakaera fase ezberdinetan zehaztea.

Glaziarrak izan dituen fase ezberdinen zehaztapena egin ondoren, lorturiko emaitzak serie klimatikoarekin eta Pirinioetako gainontzeko glaziarren bilakaerarekin alderatu da.

3.3. Emaitzak:

Bildutako ortoargazkiek, argazki zehar zein datu zientifiko historikoek, Las Néous glaziarraren bilakaera berreraikitzea ahalbidetu dute LIA garaiaren amaieratik gaur egun arte (1. Taula). Pirinioetako glaziarren inguruko interesa zein ikerketak asko areagotu diren arren azken hamarkadetan, Las Néous glaziarraren inguruko berreraikitzerik ez dago dokumentatuta.



6.Irudia: Las Néous glaziarra 1905. urtean (Ludovic Gaurier).

LIA garaian glaziarrak izan zuen azalera maximoa kanpoko morrenak adierazten du, kasu honetan 51,39 ha-ko azalera izatera iritsi zen, non morrenaren luzeera 1784 m-koa zen. LIA-ren aurrerapen maximoan (XVII. mendea) kanpoko morrenak depositatu ziren (Serrano et al., 2002), aurrerapen maximo honen ondoren atzeraka-fase orokor bat izan zen eta berriro aurrerapen txiki baina azkar bat, 1820-1840 urteen artean kokatzen dena, LIA garaiaren azken fasearik batera (Chueca eta Julian, 1996), garai honetan glaziarrak izan zuen hedadura 43 ha-koa da, bere maximoarekiko azaleraren %16,3 galdu zuelarik.

Glaziarrak atzera egiten duen heinean harriak eta gainontzeko materialak (higaduraren bitartez eskuratu dituenak) depositatzen doaz, metaketa honek "Till" izena hartzen du, eta glaziarrak aurrera eginez gero metaketa hauetan estria glaziarrak (fluted moraines) sortzen dira. Las Néous glaziarraren kasuan aurrerakada hori argi ikusten da (ikus 7. Irudia), gainera, aurrekaldeko morrena suntsituta ageri da, pultsazio batek suntsitu izan balu bezala.



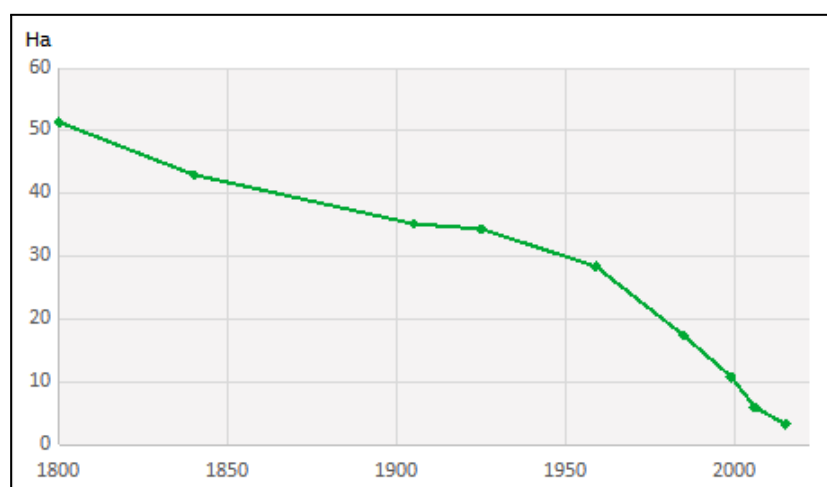
7.Irudia: Las Néous glaziarraren inguruko estria glaziarrak (fluted moraines) eta suntsitutako morrenak (Izagirre, 2022).

Pultsazio honen ondoren aurrerapenen ebidentzia geomorfologikorik ez da ageri eta atzerakada global bat hasi zen XX. mendearekin batera. Mende honen hasieran ageri den informazio eskasia nabaria da. Beraz, glaziarraren azalera estimatzeko argazki aereoak zein historikoak erabili dira. 1905. urtean glaziarrak zuen azalera 35,2 ha-koa zela estimatzen da, Bretxa de la Labassa-tik ateratako argazki baten bidez. 1924. urtean glaziarrak zuen azalera kalkulatzeko, aldiz, argazki aereo bat erabili da, non bere azalera 34,4 ha-koa dela estimatuz. Beraz, argi ikusten da, XX. mendeko lehen hamarkadetan, glaziarra nahiko egonkor mantendu zela. 1959. urtean glaziarrak zuen azalera 28,4 ha-koa zela estimatzen da (Frantziako Geografiako Institutu Nazionalak ateratako argazki baten bitartez), glaziarraren atzeratzea gero eta nabarmenagoa dela adieraziz, nahiz eta oraindik nahiko egonkor mantentzen zen. 1985. urterako iada glaziarraren atzerakada oso nabarmena da, 17,4 ha-ko azalerarekin, Jacques Jolfre frantziarrak ateratako argazki baten bitartez estimatuta (ikus 9. irudia).

1.Taula: Las Néous glaziarraren azaleraren eboluzioa, Izotz Garai Txikitik gaur egun arte.

AZALERAREN EBOLUZIOA LAS NÉOUS GLAZIARREAN										
	LIA Max	XIX. mendea	1905	1925	1959	1985	1999	2006	2015	2022
Azalera (Ha)	51,4	43	35,2	34,4	28,4	17,4	10,8	6	3,3	2,36
Azalera galera LIA garaitik (%)	-	-16,3	-31,5	-33,1	-44,8	-66,2	-78,9	-88,3	-93,6	-95,4
Azalera galera aurreko fasearekiko (%)	-	-16,3	-18,1	-2,3	-17,4	-38,7	-37,70	-44,7	-45	-28,5
Frontearen altitudea (m)	2342,7	2355,8	2376,9	2375,2	2382,1	2481,3	2656,4	2703,8	2845,7	2830,9

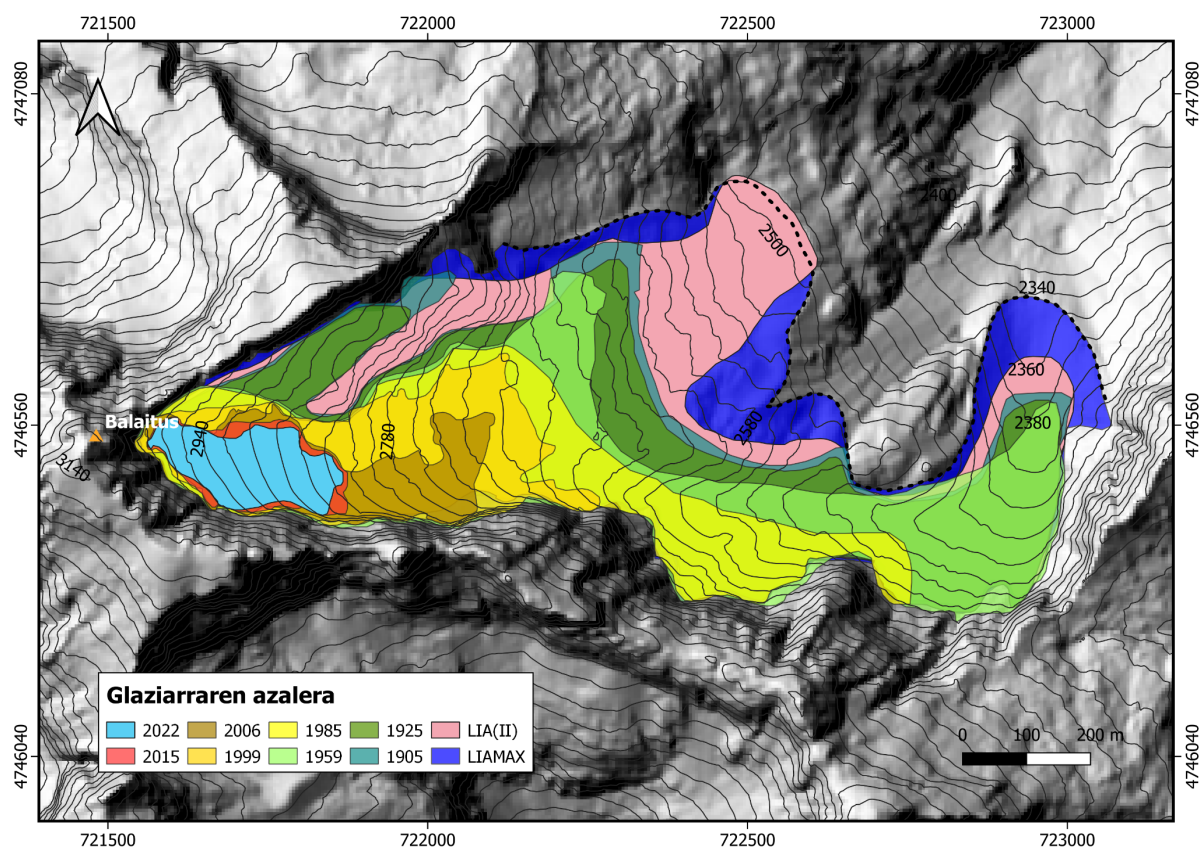
XXI. mendearen hasieratik aurrera glaziarraren inguruko ortoargazki kopurua areagotu egiten da, honek izan zuen azalera kalkulatzeko erretzen duenak. Mende honen hasierarako glaziarrak jasan zuen atzerakada oso nabarmena da, 10,8 ha-ko azalera izanik, atzerakada honen adierazle gisa glaziarra 2 zatitan banatu zela daukagu. 2006, 2015 eta 2022. urtean glaziarrak zuen azalera 6 ha, 3,3 ha eta 2,36 ha-koa zen, lehen bezala ortoirudien bitartez kalkulatu (ikus 9. irudia). Aipatzekoa da ortoirudien eta GIS-aren bitartez eskuratutako azalera 2,8 ha-koa dela 2022. urterako, baina Eñaut Izagirrek (UPV/EHU) 2022ko abuztuaren 30an burututako neurketek (DJI Mavic Dron baten bitartez) 2,36 ha-ko azalera ematen dute, kontuan izanda dron hauen bitartez egindako neurketak zehatzagoak direla, 2,36 ha hartu da erreferentzia gisa.



8.Irudia: Las Néous glaziarraren azalera aldaketak.

Las Néous glaziarrak beraz, bere gehieneko hedapenetik gaur egun arte bere azaleraren ia %95-a galdu du, garai batean izan zenaren arrasto bat baino ez delarik. Glaziarrak urteetan zehar izan duen eboluzioa zehaztuz, sei etapa glazial bereizi genezake:

1. **Izotz Gari Txikiko glaziarraren maximoa:** XVII. mendeko azken hamarkaden eta XVIII. mendeko lehen hamarkaden artean glaziarrak bere hedadura historiko gorena lortu zuen. Hedapen maximo hauen adierazle kanpoko morrenak ditugu.
2. **19. mendeko aurrerakada:** XIX. mendean aurrerakada motz eta azkar bat eman zen, honen adierazle gisa estria glaziarrak (fluted morraines) eta morrena terminalaren suntsipena ditugu.
3. **Glaziarraren atzerakada:** Bere hedapen maximetik XX. mendearen hasieraraino bere azaleraren %31,5 galdu zuen.
4. **Glaziar oreka:** XX. mendeko lehenengo hamarkadetan glaziarrak ez zuen aldaketa nabarmenik jasan, 1905-1925 tartean azaleraren %2,3 galduz soilik.
5. **Etengabeko atzerakada:** 1925. urtetik 60-ko hamarkadaraino glaziarrak jasan zuen atzerakada nahiko nabarmena da, bere azaleraren %17,4 galduz.
6. **Atzerakada drastikoa:** 60. hamarkadatik aurrera glaziarrak izugarritzko atzerakada bat jasan du, hamarkada horrekin alderatuz azaleraren %90,1 galdu duelarik.



9.Irudia: Las Néous glaziarraren eboluzioa, Izotz Garai Txikitik gaur egun arte (Iturria: LIDAR-a CNIG eta elaborazio propioa).



1925



2000



2011

10.Irudia: Las Néous glaziarra, 1925 (Ludovic Gaurier), 2000 (Pierre René) eta 2011 (Gabriel Nogué).

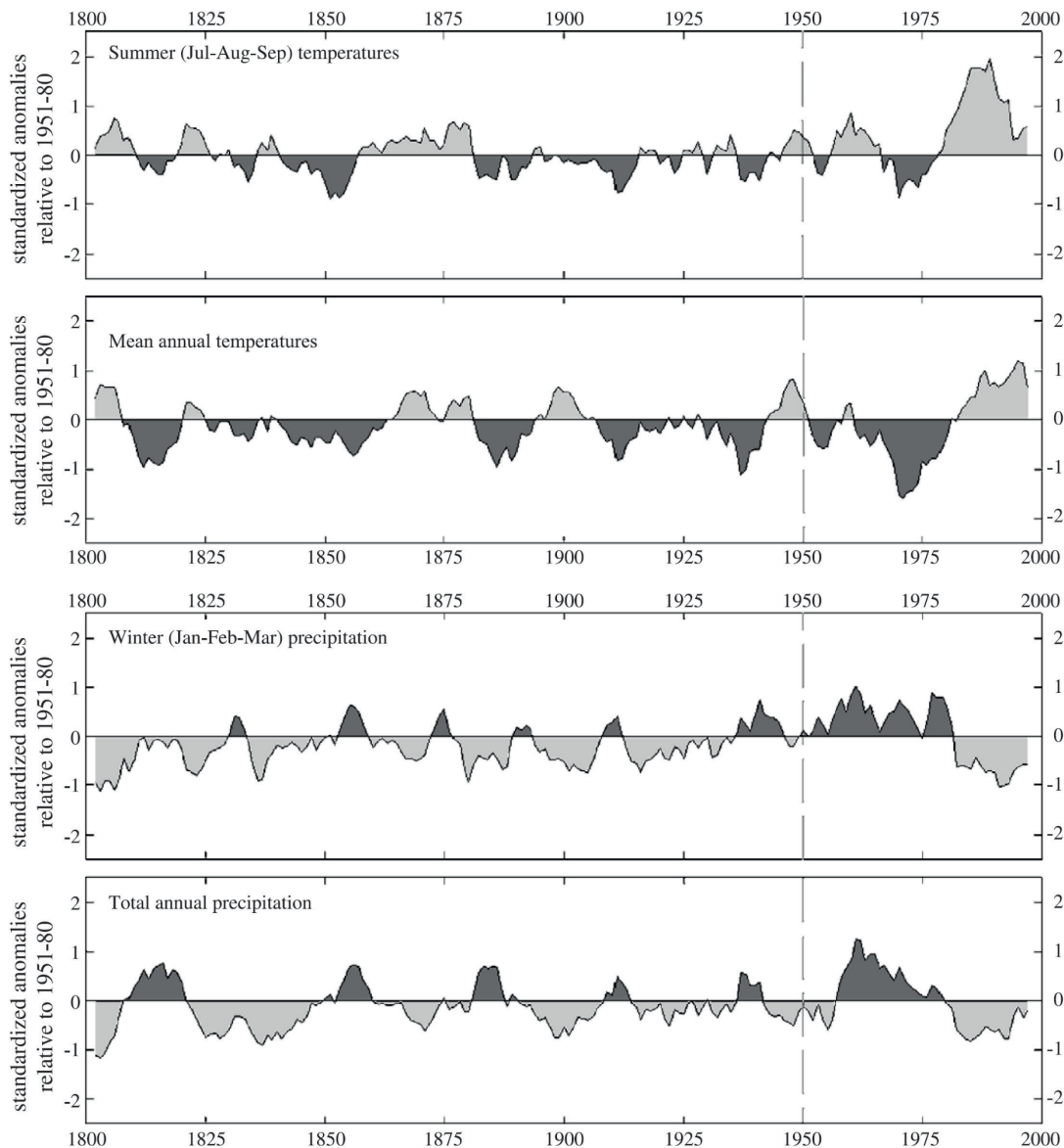
3.4. Eztabaida:

Glaziarrek epe luzeko klima-aldaketei erantzuten diete, baita urte batetik bestera izandako gorabehereri ere (Roe, 2011). Eta hori bera ikusten da Las Néous glaziarraren kasuan, non 11. Irudian ikusten den serie klimatikoaren eta glaziarrak jasandako sei etapen arteko korrelazioa nahiko altua den.

Glaziarrak pairatu zuen 2. etapa (XIX. mendeko aurrerakada alegia) garai hartan eman zen klima aldaketaren erantzuna izan zen, non XIX. mendearen amaieran eman ziren temperaturen beherakadak eta prezipitazioen areagotzeak glaziarraren handitzea izan zuten ondorio. Gertakizun hau Pirinioetako 17 glaziar (2. Taula) ezberdinetan dago dokumentatuta, estria glaziar (fluted morraines) zein pultsazio-morrenen bitartez (Serrano eta Martín-Moreno, 2018).

2. Taula: Gune morrenikoetan estria glaziarrak dituzten zirkuak Pirinioetan (Serrano eta Martín-Moreno, 2018)

Nº	Glacier	Or.	Alt. m a.s.l.	Rock ¹	Basin ²	Climate ³	Present day ice ⁴
1	Infierno Occ	N	3081	S	S	OT	G1
2	Infierno Or	N	3076	S	S	OT	Ip
3	Oulettes de Gaube	N	3299	L, S	N	O	G1
4	Monte Perdido	N	3325	L, Sd	S	M	G1
5	Marboré	NNE	3251	Sd, L	S	M	Ip
6	La Paül	NNE	3321	S	S	CM	G
7	Literola	S	3107	G	S	CM	-
8	Tempestades	NNE	3345	G	S	CM	G
9	Barrancs	NNE	3404	G	S	CM	G
10	Las Neous	N	3146	G	N	O	G
11	Gourg Blancs	N	3064	G	N	CM	Ip
12	Cabrioules	N	3107	G	N	CM	Ip
13	Maupas	N	3111	G	N	CM	Ip
14	Bugarret		3038	G	N	CO	Ip
15	Aneto	N	3354	G	S	CM	G
16	Perdiguero	NE	3219	G	S	CM	-
17	Coronas	SW	3404	G	S	CM	-

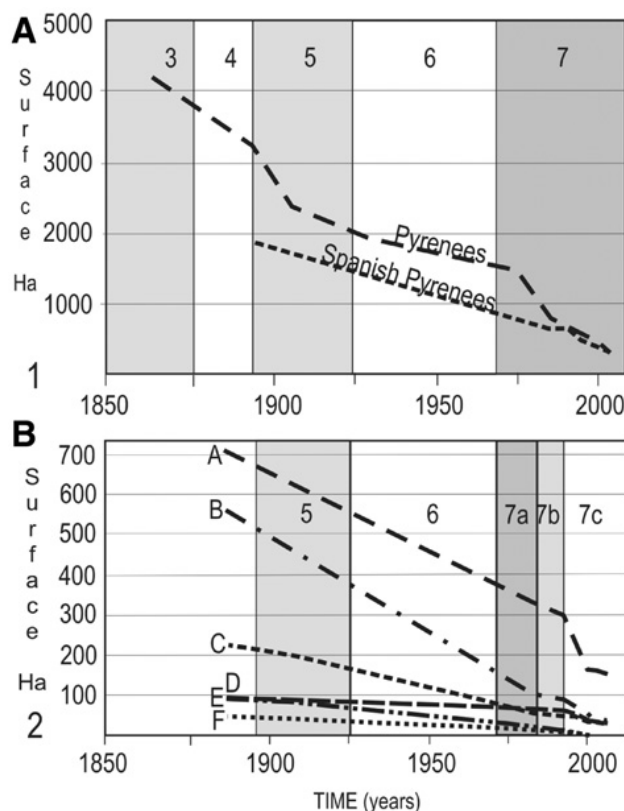


11. Irudia: Capdellako estazioko datu klimatikoak eta Aragoiko AEMETeko datu instrumentalak (Chueca, et al 2007).

Garai honen ostean hamarkada batzuetan zehar eman ziren baldintza klimatikoak lehorragoak eta beroagoak izan ziren, glaziarraren atzerakada emanez (3. etapa). Izan ere, ikerketa batzuek (Jones et al., 1998; Mann et al., 1999) garai honetarako Izotz Garai Txikia bukatutzat ematen dute. XX. mendeko lehenengo hamarkadetan eman ziren baldintza klimatikoak nahiko orekatsuak izan ziren 50. hamarkada baino lehenago arte, tenperaturen igoera eta prezipitazioen jaitsiera bat emanez, aldaketa hauek bat egiten dute glaziarraren eboluzioarekin, non 1925. urtera arte glaziarra orekan mantendu zen (4. etapa) eta 1925-1960 artean atzerakada ematen hasi zen (5. etapa), 40. hamarkadan eman zen tenperaturen gorakadekin egongo delarik lotuta seguruenik. Serie klimatikoari erreparatu, 1960-1980 tartean tenperaturak hotzagoak eta prezipitazioak ugariagoak izan zirela ikusten

da, baina garai honetan zehar Las Néous glaziarrek atzerakada bortitza pairatzen jarraitu zuen (6. etapa). Baina hamarkada hortatik aurrera ematen den tenperaturen igoera eta prezipitazioen jaitsiera oso nabarmena da, glaziarrek jasan duen beherakada bortitzarekin bat eginez.

Bestalde, Pirinioetako beste glaziar batzuek jasan duten eboluzioari erreparatzen badiogu, antzekotasun oso handiak ikus genezake. Ondorengo irudian (12. Irudia) Pirinioetako glaziarrek jasan duten azalaren aldaketak ageri zaizkigu, LIA garaiaren amaieratik gaur egun arte.



12.Irudia: Glaziarren bilakaeraren faseekin lotutako gainazal-galeraren kurbak. (A) Pirinioetako glaziarrek; (B) Pirinioetako hegoaldeko mendigune adierazgarriak: A, Maladeta mendigunea; B, Monte Perdido mendigunea; C, Posets mendigunea; D, Infierno mendigunea; E, Perdiguero mendigunea; F, La Munia mendigunea. 3-7c zenbakiak Pirinioetako LIA-ren faseei dagozkie (González-Trueba et al.,2008).

Antzeman daitekeen bezala jasandako atzerakada fase ezberdinak oso antzekoak dira Las Néous glaziarrean aurkitutako faseekin. LIA garaiaren amaieratik XX. mendeko lehenengo hamarkadetaraino jaitsiera nahiko nabarmena delarik azalaren. Lehen hamarkada hoietatik 80. hamarkadaraino jaitsiera ematen jarraitzen da baina ez hain nabarmena, eta garai horretatik gaur egun arte atzerakada drastiko bat ematen da.

Beste glaziar batzuekin alderatzen badugu, La Paul eta Maladetako glaziarrekin adibidez, pairatu dituzten fase guztiekiko antzekotasun oso handia ematen da, 1960-1980 tartean izan ezik. Garai honetan La Paul glaziarra nahiko egonkor mantendu zen; bolumena galdu zuen, baina azalera nabarmen murriztu gabe (-%3,1) (Rico et al., 2013). Bestalde, Maladeta glaziarrean, garai berberean, atzerakada fasea nabarmen egonkortu zen, urtero soilik 0,13 ha galduz (Chueca et al., 2005).

Atzerakada horren egonkortzearen erantzulea 1960-1980 tartean eman ziren baldintza klimatikoak (prezipitazio ugariagoak eta tenperatura hotzagoak) dira. Baina baldintza horiek eman arren, Las Néous glaziarrean ez zen egonkortzerik eman, are gehiago, 60. hamarkadatik aurrera atzerakada drastiko bat jasaten hasi zen. Honen erantzule nagusia Las Néous glaziarrek pairatu duen izugarritzko desoreka izan daiteke. 3. Taulan ikus daitezkeen bezala Balaitous mendiguneko (Las Néous glaziarra aurkitzen den mendigunea) ELA-k (Equilibrium Line Altitude edo Glaziarren Oreka-Lerroa) izugarritzko gorakada bat jasan du altitudetan, ELA zenbat eta altuago egonik elurra metatu eta atxikitze eta prozesu glaziarrek mantentzeko aukera eragotziz (Rico, 2019). Bestalde, tenperaturen gorakada ere nabarmena izan da, 1,93°C-ko igoera emanez, Pirinio osoan eman den tenperaturen gorakada (1,2-1,5°C) baino altuagoa izanik, eta honen ondorioz Balaitous mendigunean eman den ELA-ren gorakada beste mendiguneetan eman dena baino nabarmenagoa da.

3. Taula: ELAk LIA-ren amaieran, XXI. mendearen hasieran eta 2016an. ELA-ren igoera 1850etik 2016ra, eta tenperaturen igoera mendigune adierazgarrietan eta Pirinio osoan (Rico, 2019).

MACIZO	ELA PEH	ELA comienzo XXI	ELA 2016	PEH - 2016 (m)	Aumento °C
BALAITOUS	2621 ¹	2805 ¹	2943	322	1,93
INFIERNOS	2650 ¹	-	2849	199	1,19
VIGNEMALE	-	-	2828	-	-
MONTE PERDIDO	2700 ²	2937 ²	2992	292	1,75
MUNIA	-	-	2800	-	-
POSETS	2930 ³	3074 ³	3039	109	0,65
PERDIGUERO	-	-	2896	-	-
ANETO-MALADETA	2879,5 ⁴	3000-3010 ⁴	3135	255	1,53
MONT VALIER	-	-	2506	-	-
PIRINEO	2805-2815 ⁵	3000 ⁵	3079	269	1,61

Eman ziren baldintza hauen ondorioa izan daiteke Las Néous glaziarrek egonkortzerik pairatu ez izana. Baina aipatzekoa da ere 1960-1980 dagoen informazioa eskasia dela eta (lortu den irudi bakarra 1985. urtekoa da, garai hori iada pasata), tarte horretan eman ahal zitezkeen egonkortzea detektatu ez izana.

Lortutako emaitza hauek aurretik egindako azken lanekin bat datoz, non hauek Pirinioetako glaziarren murrizketa eta higadura ez direla gelditu azken urteotan adierazten duten, glaziar hauek desoreka nabarmena dutelarik eskualdeko klimarekin, eta litekeena da datozen hamarkadetan desagertzea (Vidaller et al., 2021).

4. Ondorioak:

Las Néous glaziarraren bilakaera aztertu da Izotz Garai Txikitik gaur egun arte, eman diren baldintza klimatikoaren aldaketek erantzun oso azkarra emanez, eta Pirinioetako glaziarren aldaketa globalaren geodiktzaile sentikorrek direla nabarmenduz.

Argazki historikoek, ortofotodien zein satelite-irudien Las Néous glaziarrean 6 etapa bereiztea ahalbidetu dute: 1. *Izotz Gari Txikiko glaziarraren maximoa*; 2. *19. mendeko aurrerakada*; 3. *Glaziarraren atzerakada*; 4. *Glaziar oreka*; 5. *Etengabeko atzerakada*; 6. *Atzerakada drastikoa*. LIA garaitik gaur egun arte bere azaleraren %95 inguru galdu du glaziarren, izugarriko atzerakada emanez. Serie klimatikoekin zein Pirinioetako beste glaziar batzuek jasan duten eboluzioarekin alderatu ostean, antzekotasun oso nabarmenak aurkitu dira pairatu dituzten faseen artean. Beraz, Las Néous glaziarra, Pirinioetako beste glaziarren bezala, klimarekiko ezegonkortasun egoeran dago, atzeratze eta txikitze prozesuak ez direlarik gelditu. Eta ondorioz, glaziar izatetik, mugimendu gabeko izoztegi bat izatera pasatzeko fasea etorkizun hurbil batean eman daiteke.

Azkenik, badirudi oso urte gutxiko erantzun-denbora dagoela tenperaturaren eta prezipitazio-aldaketaren eta Las Néous glaziarraren egonkortzearen edo atzerakadaren artean. Glaziar batek klima-gorabeherei erantzuteko duen atzerapen-denbora, batez ere, bere tamainaren eta latitude-kokapenaren arabera denez, klima-aldaketak, baita ahulak ere, eragiten dituzten aldaketak nabarmenagoak dira ingurune beroagoetan kokatutako glaziar txikiagoetan (Pirinioetakoak, esaterako), latitude-eremu altuagoetan dauden glaziar handiagoengan baino. Hori dela eta, Pirinioetako glaziar-hondarrak proxy adierazle baliagarriak eta fidagarriak dira gaur egungo klima-aldaketek erdi-mendiko latitudeetan duten inpaktua aztertzeko.

Bibliografía:

- Aschwanden, A. (2014). Dynamics of Glaciers. *Geophysical Institute*.
- Bello, A. P. (2017). *Evolución de los glaciares en los macizos de Balaitús y Posets*. [Gradu Amaierako Lana, Zaragozako Unibertsitatea].
<https://zaguan.unizar.es/record/62611>
- Caballero, M., Lozano, S., eta Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista digital universitaria*, 8(10), 1-12.
- Chueca, J., eta Julián, A. (1996). Datación de depósitos morrénicos de la Pequeña Edad del Hielo: Macizo de la Maladeta. *Dinámica y Evolución de medios cuaternarios*, 171-182.
- Chueca, J., Julián, A., Saz, M.A., Creus, J., eta López-Moreno, J.I. (2005). Responses to climatic changes since the Little Ice Age on Maladeta Glacier (Central Pyrenees). *Geomorphology*, 68(3-4), 167-182.
- Chueca, J., Julián, A., eta López-Moreno, J. I. (2007). Recent evolution (1981-2005) of the Maladeta glaciers, Pyrenees, Spain: extent and volume losses and their relation with climatic and topographic factors. *Journal of glaciology*, 53(183), 547-557.
- Izagirre, E., López-Moreno, J. I., Revuelto, J., eta Serrano, E. (2022). State of the Pyrenean glaciers and their disappearance/evolution to ice-patches since 2000. (Argitaratu gabe).
- Finn, D. S., Khamis, K., eta Milner, A. M. (2013). Loss of small glaciers will diminish beta diversity in Pyrenean streams at two levels of biological organization. *Global Ecology and Biogeography*, 22(1), 40-51.
- Fleming, S. W., eta Clarke, G. K. (2003). Glacial control of water resource and related environmental responses to climatic warming: empirical analysis using historical streamflow data from northwestern Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 28(1), 69-86.
- Francou, B., eta Pouyaud, B. (2008). Glaciares: ¿cómo y dónde estudiarlos?. *Revista Virtual REDESMA*, 2, 9.
- González-Trueba, J. J., Moreno, R. M., Martínez de Pisón, E., eta Serrano, E. (2008). Little Ice Age Glaciation and current glaciers in the Iberian Peninsula. *The Holocene*, 18(4), 551-568.
- González-Trueba, J. J., Moreno, R. M. eta Serrano, E. (2005). El glaciario de la Pequeña Edad del Hielo en las Montañas Ibéricas. Síntesis y estado actual de conocimiento. *Rev. C & G.*, 21 (1-2), 57-86.

- Grunewald, K., eta Scheithauer, J. (2010). Europe's southernmost glaciers: response and adaptation to climate change. *Journal of glaciology*, 56(195), 129-142.
- Hood, E., eta Berner, L. (2009). Effects of changing glacial coverage on the physical and biogeochemical properties of coastal streams in southeastern Alaska. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114(G3).
- IPCC. (2023). *Sixth Assessment Report: Climate Change 2023. International Panel on Climate Change*. UNEP.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf
- Jones, P. D., Briffa, K. R., Barnett, T. P., eta Tett, S. F. B. (1998). High-resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with General Circulation Model control-run temperatures. *The Holocene*, 8(4), 455-471.
- Julián, A., Chueca, J., eta René, P. (2004). El glaciario actual en los macizos de Balaitús e Infiernos-Punta Zarra (Pirineo Central). *Geografía Física de Aragón. Aspectos generales y temáticos, Univ. Zaragoza e Institución Fernando el Católico*, 95-101.
- Liniger, H., Weingarten, R. eta Grosjean, M. (1998). Mountains of the world: Water towers for the 21st century. *Mountain Agenda*, 1-24.
- Mann, M. E., Bradley, R. S., eta Hughes, M. K. (1999). Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical research letters*, 26(6), 759-762.
- Marti, R., Gascoin, S., Houet, T., Ribièrre, O., Laffly, D., Condom, T., ... eta René, P. (2015). Evolution of Ossoue glacier (French Pyrenees) since the end of the Little ice age. *The Cryosphere*, 9(5), 1773-1795.
- Moore, R. D., Fleming, S. W., Menounos, B., Wheate, R., Fountain, A., Stahl, K., ... eta Jakob, M. (2009). Glacier change in western North America: influences on hydrology, geomorphic hazards and water quality. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(1), 42-61.
- Oliva, M., Ruiz-Fernández, J., Barriendos, M., Benito, G., Cuadrat, J. M., Domínguez-Castro, F., ... Vicente-Serrano, S. M. (2018). The little ice age in Iberian mountains. *Earth-Science Reviews*, 177, 175-208.
- OPCC. (2018). *El cambio climático en los Pirineos: impactos, vulnerabilidades y adaptación Bases de conocimiento para la futura estrategia de adaptación al cambio climático en los Pirineos*.
<https://www.opcc-ctp.org/sites/default/files/documentacion/opcc-informe-es-print.pdf>

- René, P. (2016). Les glaciers des Pyrénées françaises. Cycle glaciaire 2015-16. *Association Moraine*.
- Rico, I. (2019). Los glaciares de los Pirineos. *Estudio glaciológico y dinámica actual en el contexto del cambio global*. Euskal Herriko unibertsitatea.
<https://addi.ehu.es/handle/10810/33085>
- Rico, I. (2022). Comunicación & gestión del riesgo para alpinistas y guías de montaña. Kirolene. Gobierno Vasco.
- Rico, I., Izagirre, E., Serrano, E., eta López-Moreno, J. I. (2017). Superficie glaciaria actual en los Pirineos: Una actualización para 2016. *Pirineos*, 172, e029-e029.
- Rico, I., Serrano, E., eta de Sanjosé Blasco, J. J. (2013). Responses to Climatic Changes since the Little Ice Age on La Paul Glacier (Central Pyrenees). *Krei*, (13), 105-116.
- Roe, G. H. (2011). What do glaciers tell us about climate variability and climate change?. *Journal of Glaciology*, 57(203), 567-578.
- Rubial, M. J. (2005). Los glaciares dinámica y relieve. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 13(3), 230-234.
- Serrano Cañadas, E., eta Martín Moreno, R. (2018). Surge glaciers during the Little Ice Age in the Pyrenees.. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 44(1), 213-244.
- Serrano Cañadas, E., Agudo, C., eta González-Trueba, J. J. (2002). La deglaciación de la alta montaña. Morfología, evolución y fases morfogenéticas glaciares en el macizo del Posets (Pirineo Aragonés). *Cuaternario y geomorfología*, 16(1-4), 111-126.
- Serrano, E., de Sanjosé, J. J., eta González-Trueba, J. J. (2010). Rock glacier dynamics in marginal periglacial environments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(11), 1302-1314.
- Solomina, O. N., Bradley, R. S., Jomelli, V., Geirsdottir, A., Kaufman, D. S., Koch, J., ... Yang, B. (2016). Glacier fluctuations during the past 2000 years. *Quaternary Science Reviews*, 149, 61-90.
- Tribot-Laspierre, D. (1992). El Parque Nacional de los Pirineos franceses. *Munibe Ciencias Naturales. Natur zientziak*, (44), 113-117.
- Vidaller, I., Revuelto, J., Izagirre, E., Rojas-Heredia, F., Alonso-González, E., Gascoin, S., ... López-Moreno, J. I. (2021). Toward an Ice-Free Mountain Range: Demise of Pyrenean Glaciers During 2011–2020. *Geophysical Research Letters*, 48(18), e2021GL094339.
- Zemp, M.; Roer, I.; Käab, A.; Hoelzle, M.; Paul, F.; Haeberli, W. WGMS (2008): Global Glacier Changes: Facts and Figures. *World Glacier Monitoring Service*.

- Zuo, Z., eta Oerlemans, J. (1997). Contribution of glacier melt to sea-level rise since AD 1865: a regionally differentiated calculation. *Climate Dynamics*, 13, 835-845.