



**Universitat de les  
Illes Balears**

Facultat de Filosofia i Lletres

**Memòria del Treball de Fi de Grau**

# Anàlisi de l'evolució temporal del sistema de glaceres del Kilimanjaro (1975-2019)

Marc Aguiló Rodríguez

**Grau de Geografia**

Any acadèmic 2020-21

DNI de l'alumne: XXXXXXXXXX

Treball tutelat per Enrique Morán Tejada

Departament de Geografia

S'autoritza la Universitat a incloure aquest treball en el Repositori Institucional per a la seva consulta en accés obert i difusió en línia, amb finalitats exclusivament acadèmiques i d'investigació	Autor		Tutor	
	Sí	No	Sí	No
	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Paraules clau del treball: Criosfera, glacera, canvi climàtic, teledetecció, retrocés glacial, temperatura, topografia i radiació.



## ÍNDEX

<b>1. Introducció.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Àrea d'estudi .....</b>	<b>9</b>
<b>3. Metodologia .....</b>	<b>10</b>
<b>4. Resultats.....</b>	<b>12</b>
<b>4.1. Evolució de les glaceres del Kilimanjaro.....</b>	<b>12</b>
<b>4.2. Influència de les temperatures al comportament de les glaceres.....</b>	<b>15</b>
<b>4.3. Influència dels aspectes topogràfics al comportament de les glaceres.....</b>	<b>16</b>
<b>4.3.1. Altitud.....</b>	<b>16</b>
<b>4.3.2. Pendent .....</b>	<b>18</b>
<b>4.3.3. Orientacions i radiació solar incident .....</b>	<b>19</b>
<b>5. Discussió .....</b>	<b>20</b>
<b>6. Conclusions.....</b>	<b>23</b>
<b>7. Agraïments .....</b>	<b>23</b>
<b>8. Bibliografia .....</b>	<b>24</b>

## Llista de figures

<b>Figura 1.</b> Localització del sistema de glaceres del Kilimanjaro .....	9
<b>Figura 2.</b> Esquema metodològic .....	12
<b>Figura 3.</b> Evolució del retrocés glacial del Kilimanjaro .....	14
<b>Figura 4.</b> Mapa comparatiu de l'extensió de la capa de gel, extreta de l'anàlisi NDSI dels anys 1975 i 2019.....	15
<b>Figura 5.</b> Evolució de les anomalies estandarditzades de la temperatura anual de l'àrea d'estudi dels anys compresos entre el 1948-2020.....	16
<b>Figura 6.</b> Diagrama de caixes que representa els valors de l'altitud dels píxels ocupats per gel en el Kilimanjaro per cada any analitzat en l'altitud en què es localitza. ....	17
<b>Figura 7.</b> Gràfic de densitat de Kernel, de la distribució de les masses de gel depenent de l'altitud pels anys 1975 i 2019 .....	17
<b>Figura 8.</b> Diagrama de caixes que representa la capa de gel del Kilimanjaro per cada any analitzat i el pendent en què es localitzen .....	18
<b>Figura 9.</b> Gràfic de densitat de Kernel, de la distribució de les masses de gel depenent del pendent pels anys 1975 i 2019.....	19
<b>Figura 10.</b> Gràfic de la distribució de les masses de gel del Kilimanjaro de l'any 1975 i 2019 depenent de la orientació del terreny .....	20

## Llista de taules

<b>Taula 1.</b> Metadades del conjunt d'imatges emprades pel seu anàlisi .....	11
<b>Taula 2.</b> Superfície total de les masses de gel del Kilimanjaro entre el període de 1975 - 2019.....	13
<b>Taula 3.</b> Percentatge de les masses de gel dels anys 1975 i 2019 per cada una de les orientacions del terreny .....	20

## **Llista d'acrònims**

CMNUCC - Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic

LEA - Línia d'Equilibri d'Altitud

EOS - Earth Observing System

GLOF - Glacial Lake Outburst Flood

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

MDT - Model Digital del Terreny

NCAR - National Center for Atmospheric Research

NCEP - National Centers for Environmental Prediction

NDSI - Normalized Difference Snow Index

PEG - Petita Edat de Gel

SIG - Sistemes d'Informació Geogràfica

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

SWIR - Short Wave Infra Red

UNESCO - Organització de les Nacions Unides per a l'Educació, la Ciència i la Cultura

USGS - United States Geological Survey

WGMS - World Glacier Monitoring Service

ZCIT - Zona de Convergència Intertropical

## Resum

Les glaceres, tot i ser un recurs important pels diferents beneficis ecològics i humans que aporten, es troben molt afectades pel canvi climàtic, un factor que contribueix a la seva pèrdua sent el Kilimanjaro un bon exemple d'aquesta realitat. Així, el present treball tracta de comprendre el grau de degradació i els patrons de distribució actuals de les seves glaceres, amb l'objectiu d'aportar una actualització de l'estat de les masses de gel i contribuir així en el seu coneixement. S'ha elaborat una anàlisi temporal actualitzada de l'estat de les glaceres del Kilimanjaro, mitjançant l'ús d'imatges satèl·lit compreses entre els anys 1975 i 2019. Els resultats demostren una dràstica reducció de les masses de gel, la qual es veu influïda per factors topogràfics (i.e. altitud, pendent i orientacions), astronòmics (i.e. radiació), i climàtics (i.e. temperatures i nuvolositat). Es tracta d'una realitat que implica importants conseqüències als sistemes naturals i humans, sent aquesta investigació una nova aportació de gran utilitat enfront del coneixement de l'estat de les glaceres del Kilimanjaro, i pel desenvolupament de noves estratègies que ajudin a la seva preservació.

**Paraules clau:** Criosfera, glacera, canvi climàtic, teledetecció, retrocés glacial, temperatura, topografia i radiació.

## Abstract

Glaciers, despite being an important resource for the different ecological and human benefits they provide, are highly affected by climate change, a factor that contributes to their loss. The Kilimanjaro is a good example of this reality. Thus, the present study tries to understand the degree of degradation and the current distribution patterns of its glaciers, with the aim of providing an update of its knowledge. A temporal analysis of the Kilimanjaro glaciers has been carried out, using satellite images between 1975 and 2019. The results show a drastic reduction in ice masses, which is influenced by topography (i.e. elevation, slope, and orientation), astronomy (i.e. radiation), and climate (i.e. temperatures and cloudiness). This reality has important consequences for natural and human systems. Therefore, this research becomes a new contribution to the knowledge of the of the Kilimanjaro glaciers retreat, which can be useful for the development of new strategies helping to preserve them.

**Key words:** Cryosphere, glacier, climate change, remote sensing, glacial retreat, temperature, topography, and radiation.

## 1. Introducció

El món està veient augmentar de manera molt considerable la seva temperatura fruit del canvi climàtic (Allen et al., 2018). Aquest es tradueix en un escalfament global generalitzat, afectant de manera directa a la criosfera (i.e. glaceres, *permafrost* i neu) (Huggel et al., 2019), la qual conforma prop del 10% del total de la superfície terrestre (IPCC, 2019). Aquest procés va començar al final de la petita edat de gel (PEG) i s'ha vist accelerat dràsticament a partir de mitjans del segle XX (J.I. López-Moreno, et al., 2020) fruit de l'augment de temperatures per sobre dels nivells preindustrials (Allen et al., 2018). La criosfera de zones de muntanya per tant s'ha vist afectada negativament (Huggel et al., 2019), sent un bon exemple les glaceres, les quals com ja s'ha estudiat en innumerables ocasions (e.g. Beniston et al., 2018; Matthias Huss & Hock, 2018; J. I. López-Moreno et al., 2014; Paul & Mölg, 2014; Poveda & Pineda, 2009; Rabatel et al., 2018) han patit un important retrocés els darrers anys.

Les glaceres són grans masses de gel conformades per l'acumulació de neu precipitada al llarg dels anys (NSIDC, 2020). Aquestes són uns sistemes molt dinàmics, caracteritzats pel balanç entre l'alimentació (acumulació) i la fusió (ablació) (Liévano et al., 2012), fent així variar l'altitud de la Línia d'Equilibri d'Altitud (LEA) (Serrano Cañadas, 2005). A més, són unes masses de gel que es deformen i es desplacen de forma lenta tant per l'efecte de la gravetat sobre els vessants com pel mateix pes de la glacera (Martínez & Bremauntz, 2004). Aquestes no només es troben localitzades a zones polars, sinó que també a molts de sistemes muntanyosos, en els quals les característiques tèrmiques permeten la seva presència. Això es deu a l'efecte de l'alçada i a la seva conseqüent reducció de temperatures. D'aquesta manera, a les àrees muntanyoses de les regions àrides o semiàrides, a causa de la disminució de temperatures induïdes per l'augment d'altitud, s'hi poden desenvolupar sistemes de glaceres (Buytaert et al., 2006), les quals esdevenen una reserva hídrica en estat sòlid essencial (Morán-Tejeda et al., 2018).

La importància de les glaceres es fa evident pel gran conjunt de beneficis que proporcionen. Aquestes són una essencial font d'abastiment per a distintes comunitats humanes dins els seus respectius territoris (i.e. tant prop de la glacera com a les regions de riu avall) amb finalitats agrícoles o d'autoconsum (Hock et al., 2019). Tant és així, que una sexta part del total de la població mundial depèn de les glaceres i de la capa de neu estacional, tot i que el subministrament d'aigua provinent d'aquestes varia segons la zona (e.g una major importància als Andes tropicals que als d'Àfrica Est i Austràlia) (Taylor et al., 2009). A més, esdevenen sistemes de gran importància biològica pel fet de comptar amb una alta activitat microbiana, la qual influeix en el cicle global del carboni (Anesio et al., 2009), juntament amb la modificació de l'albedo de la superfície glacial (Hodson et al., 2010; Stibal et al., 2012). Cal tenir en compte que les muntanyes són uns escenaris molt propensos a la probabilitat d'especialització d'espècies, fet que implica la presència d'un alt nombre d'endemismes (Liévano et al., 2012). Doncs, hi ha molts d'ecosistemes que tenen una relació directa amb les glaceres, com són els aiguamolls o els *páramos*, sent aquest darrer el més vulnerable enfront de la pèrdua d'aquests sistemes (Buytaert et al., 2006). Les glaceres també tenen una gran importància cultural, les quals són un signe d'identitat per diverses comunitats humanes (Allison, 2015; Gagné et al., 2014; Jurt et al., 2015; Konchar et al., 2015), i alhora esdevenen un gran reclam turístic (Almirón, 2007; Almirón et al., 2006; Welling et al., 2015).

Tot i la gran importància de les glaceres, l'escalfament global d'avui en dia és un nou factor que contribueix a la modificació i a la pèrdua d'aquestes. Les glaceres veuen modificada la

disponibilitat d'aigua dolça (Hock et al., 2019) alhora que la producció d'energia hidroelèctrica generada a partir de l'aigua del desgel (e.g. els Andes tropicals) (Céleri & Feyen, 2009; Kaser et al., 2010; Soruco et al., 2015; Vergara et al., 2007). A més, l'augment de la temperatura i de les precipitacions contribueixen al fet de que s'hi produeixin més riscos naturals (e.g. allaus, GLOFs i esclavissades) (Faillettaz et al., 2015; Ives et al., 2010; Kohler & Maselli, 2009; Olsson et al., 2014). També s'ha relacionat la recessió de les glaceres amb la propagació de malalties com la malària, el Zika i la colera, per culpa de la formació de petits estanys d'aigua del desglaç, els quals esdevenen llocs ideals per la cria d'insectes (Epstein, 2001). Des del punt de vista socioeconòmic, s'ha estudiat també com la reducció i desaparició de les glaceres afectarà el nombre de turistes, repercutint a l'economies locals (Mitchell et al., 2009; Welling et al., 2015).

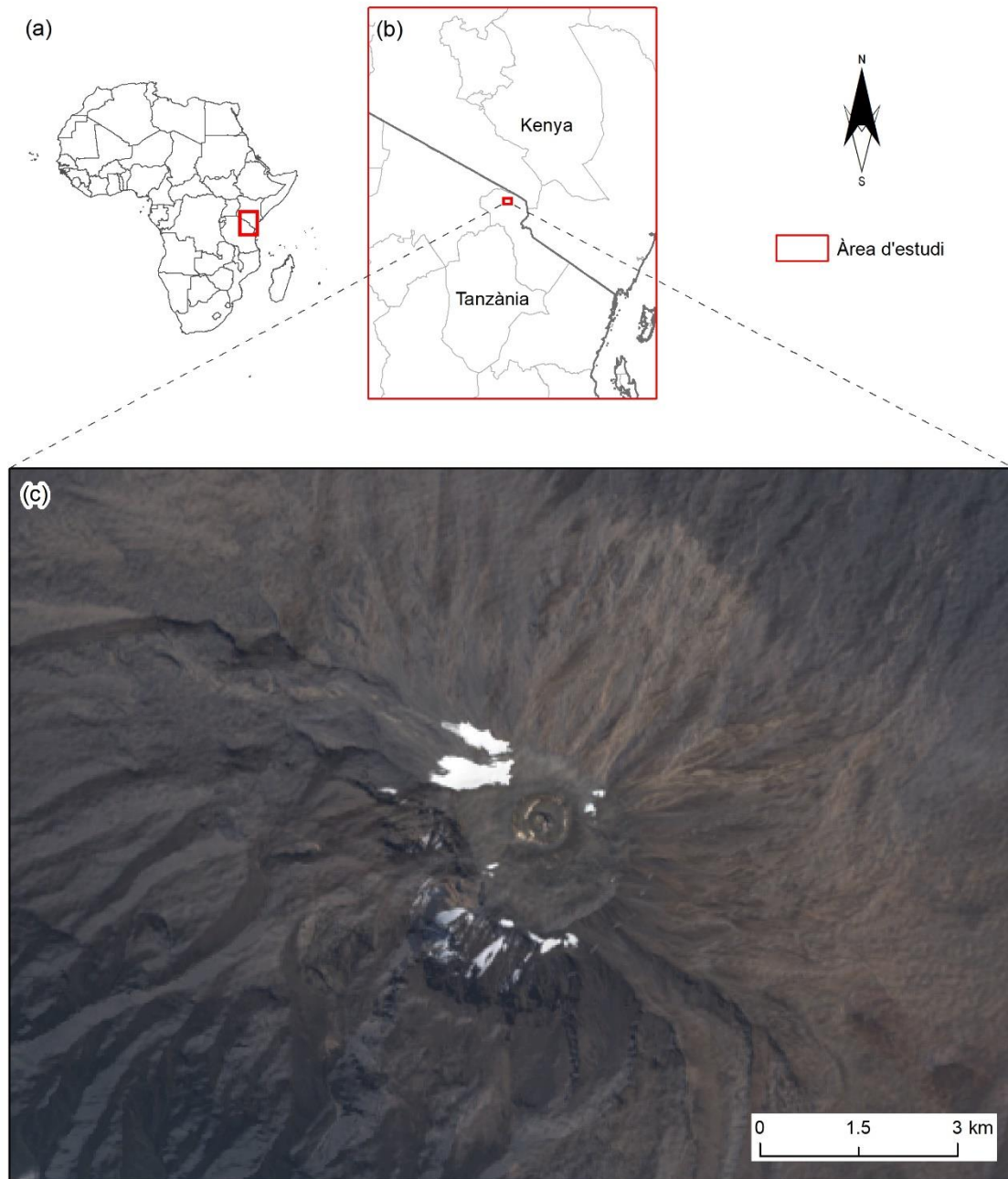
Actualment, les previsions alerten sobre uns importants canvis en la precipitació i temperatura (IPCC, 2013), dificultant el bon desenvolupament de les glaceres (Cullen et al., 2006). D'acord amb Veettil i Wang (2018), les glaceres d'Austràlia, Àfrica i dels Andes tropicals (i.e. glaceres tropicals) estan a punt de desaparèixer. Aquestes, a causa de la seva latitud, es troben especialment en perill per l'impacte característic del clima respecte a les de latituds més altes (Kaser, 1999). A més, una gran part de les glaceres tropicals es localitzen sobre sistemes volcànics, fet que provoca que els materials piroclàstics calents emesos, juntament amb la deposició de cendres volcàniques sobre les glaceres (i.e. reducció de l'albedo) contribueixin en la seva ràpida recessió (Morán-Tejeda et al., 2018; Vuille et al., 2017). Per tant, les glaceres són uns sistemes amb un elevat grau de sensibilitat als canvis en l'atmosfera, sent considerades unes fidels indicadores d'aquestes alteracions (Liévano et al., 2012), i conseqüentment del canvi climàtic (Beniston et al., 2018; Francou et al., 2003; Hoffmann, 2008; Veettil & Kamp, 2019; WGMS, 2008). Amb tot i això, cal destacar que també s'han vist modificades per altres factors, les quals han experimentat considerables fluctuacions impulsades per les variacions multidecadals de l'activitat solar i volcànica, així com pels canvis en la circulació atmosfèrica (Hock et al., 2019). Tots aquests canvis impliquen importants conseqüències directes per l'ecosistema i per les diferents poblacions humanes que en depenen (Hock et al., 2019).

El Kilimanjaro s'inscriu en aquest context, una muntanya situada enmig de la sabana africana i conformada per masses de gel a la seva part superior. Són moltes les investigacions que evidencien l'estat crític de les seves glaceres i els pocs anys de vida que els hi resten (e.g. Bohleber et al., 2017; Cullen et al., 2006, 2013; Kaser et al., 2004). El darrer estudi és de Stadelmann et al (2020), el qual abasta fins a l'any 2011, i que analitza l'estat de les dues masses més extenses que resten al cim del Kilimanjaro. Així i tot, l'estudi més complet sobre l'anàlisi temporal de les glaceres del Kilimanjaro és el de Cullen et al, (2013) el qual abasta el període d'anys comprès entre el 1912 i el 2011. La falta d'una anàlisi actualitzada sobre l'estat d'aquestes glaceres demostra la necessitat d'abordar aquestes qüestions. Per tant, el present estudi s'inscriu en aquest context, actualitzant l'anàlisi de l'estat de les glaceres del Kilimanjaro – a partir de l'anàlisi multiespectral d'imatges satèl·lit – i la seva evolució temporal entre els anys 1975 i 2019. Així, l'objectiu és comprendre el grau de degradació de les glaceres i els seus patrons de distribució actuals per poder contribuir al desenvolupament de noves estratègies que ajudin a la seva preservació.



## 2. Àrea d'estudi

El Kilimanjaro és el pic més alt d'Àfrica a 5895 m.s.n.m, situat a 300 km al sud de l'equador a Tanzània en la frontera amb Kenya, entre  $2^{\circ} 45'$  i  $3^{\circ} 25'$  al sud, i  $37^{\circ} 00'$  i  $37^{\circ} 43'$  a l'est (Figura 1). Aquest és un gran estratovolcà (ca. 80 per 50 km en la seva base) (Cullen et al., 2006), considerat lleugerament actiu i latent a causa de la constant presència de vapor i de fumaroles de sofre (Gabrielli et al., 2014; Kent, 1944). La darrera activitat volcànica va ocórrer al voltant de 150-200 ka, la qual va provocar la formació de l'actual crater del cim del Kibo (Nonnotte et al., 2008). Així, el Kilimanjaro està conformat per tres pics equidistants: Shira (4005 m), Mawenzi (5140 m) i Kibo (5895 m), dels quals únicament el cim més alt (i.e. Kibo) encara conserva glaceres (Cullen et al., 2006).



**Figura 1.** Localització del sistema de glaceres del Kilimanjaro; (a) Localització de l'àrea d'estudi en el conjunt del continent africà; (b) Localització del cim del Kilimanjaro en el conjunt de Tanzània; (c) Imatge del *Landsat* del dia 27 de juliol del 2019 del cim del Kilimanjaro amb les seves masses de gel.

L'àrea d'estudi, a causa de la seva localització presenta un clima equatorial, un sector que es veu influït per la Zona de Convergència Intertropical (ZCIT), la qual condiona al vent dominant de l'Oceà Índic i a les precipitacions (Otte et al., 2017). Es tracta d'una regió que compta amb dues estacions plujoses (i.e. de març a maig i de novembre a desembre), i una estació seca (i.e. de juliol a octubre) (Hardy, 2011). Quant a la precipitació, els distints vessants del Kilimanjaro presenten diferències: els del sud i sud-oest tenen un màxim anual de 2.200 mm aproximadament, i les de nord són més seques, amb menys de 100 mm (Hemp, 2006). Al cim, les precipitacions són menors, les quals es troben al voltant de 250 - 500 mm/any (i.e. en forma de neu) (Gabrielli et al., 2014; Mölg et al., 2009). Aquest fet es deu a que la precipitació anual augmenta fins a una certa altitud a partir de la qual comença a disminuir (Hardy, 2011). Quant a la temperatura mitjana anual, aquesta és de 23,4°C (Moshi, 813 m d'altitud), i va descendint gradualment fins al cim, allà on es registren mitjanes anuals més baixes: -7°C aproximadament de mitjana anua. Aquesta mitjana només té una oscil·lació de 1,3°C entre els diferents mesos (Hardy, 2011), fet que evidencia el seu estable comportament tèrmic. D'aquesta manera, tant la precipitació anual de la zona, com les seves temperatures es veuen modificades per les elevacions (Hemp, 2006). Doncs, a causa de l'estratificació de la temperatura i de les precipitacions, l'àrea d'estudi presenta una zonificació ecològica (Hardy, 2011). Segons Andreas Hemp (2006), el Kilimanjaro es pot subdividir en 4 grans zones climàtiques: zona alpina (> 3900 m.s.n.m.), zona subalpina (2800 - 3900 m.s.n.m.), zona montana (1600 - 2800 m.s.n.m.) i submontà (< 1600 m.s.n.m.), unes zones que al mateix temps presenten diferents estatges de vegetació.

Els diferents vessants del Kilimanjaro comprenen un bon nombre de rius i rierols, essent aquest una gran conca de captació d'aigua fonamental per Tanzània i Kenya (Agrawala et al., 2003; Erik Bjørndalen, 1992). Per una banda, els vessants del sud-est contribueixen principalment a la conca del riu Pangani, en la qual es desenvolupen diverses activitats com la creació d'energia hidroelèctrica, producció agrícola i pesca (Sarmett & Faraji, 1991). Per altra banda, els vessants del nord-oest formen la conca del riu Tsavo, proporcionant aigua al Parc Nacional d'Amboseli (Kenya), així com als pastors Massai (i.e pastors d'un poble africà nilòtic). Pel que fa al vessant sud, aquest gràcies a les seves condicions fèrtils i humides esdevé el vessant més densament poblat (Agrawala et al., 2003). En tot aquest context, la contribució actual de les glaceres del Kilimanjaro a la hidrologia de la regió és petita, sent tan sols un 5% de l'aportació anual (Hemp, 2005).

Finalment cal mencionar que el Kilimanjaro és considerat Parc Nacional des de l'any 1973, cobrint una extensió de 75.575 ha. A més, fou declarat el 1987 com a Patrimoni de la Humanitat de la UNESCO (UNESCO, 2020). Aquest comprèn una gran quantitat de biodiversitat, sent així un lloc molt ric quant a la seva fauna i flora. En concret destaquen un total de 2200 plantes vasculares i 140 mamífers (Agrawala et al., 2003), molts dels quals es troben en perill d'extinció. Així, fruit de la combinació de totes les característiques del Kilimanjaro, aquest és etiquetat com un fenomen natural superlatiu (UNESCO, 2020).

### 3. Metodologia

L'anàlisi temporal de l'evolució del sistema de glaceres del Kilimanjaro s'ha desenvolupat mitjançant l'ús de la teledetecció multiespectral, a partir d'imatges extrems de les missions *Landsat* del servei *USGS Earth Explorer* (USGS, 2021). Es van obtenir un total de 7 imatges compreses entre el 1975 (i.e. primer any en què es tenen imatges aptes per l'anàlisi de les

glaceres) fins al 2019 (i.e. darrer any disponible), amb un interval temporal d'aproximadament 10 anys entre cada una d'elles (Taula 1). La selecció d'imatges *Landsat* es va realitzar d'acord amb dos criteris: que la data de captura estigui compresa dins el període sec (i.e mesos entre juliol a octubre, en els quals només hi ha presència de gel amb absència de neu), i que hi hagi una mínima presència de nuvolositat. Aquests factors han propiciat petites alteracions en l'interval de captura entre les diferents imatges, a causa de les condicions freqüents de nuvolositat les quals no permetien utilitzar les imatges d'alguns anys.

Nº	Landsat	Sensor	Path	Row	Any	Mes	Dia	Nº Bandes
1	1	MSS	180	62	1975	8	15	4
2	5	TM	168	62	1987	7	3	7
3	5	TM	168	62	1996	8	12	7
4	7	ETM+	168	62	2001	8	18	7
5	5	TM	168	62	2010	8	19	7
6	8	OLI	168	62	2015	8	17	11
7	8	OLI	168	62	2019	7	27	11

**Taula 1.** Metadades del conjunt d'imatges emprades per la seva anàlisi. Extretes d'USGS Earth Explorer.

S'han realitzat càlculs topogràfics a partir del Model Digital del Terreny (MDT) del portal SRTM (CSI, 2018) amb una alta resolució espacial (i.e. 30 segons), a partir del qual s'han extret les altituds, orientacions i pendents de l'àrea d'estudi mitjançant el programari SIG ArcMap (versió 10.4.1). A més, s'han obtingut dades de temperatures mitjanes mensuals de la zona on s'emplaça el Kilimanjaro a través del projecte de la National Oceanic and Atmospheric Administration: NCEP/NCAR Reanalysis 1 (NOAA, 1994). Es tracta d'un sistema d'anàlisi de darrera generació amb una resolució espacial de 2'5° latitud per 2'5° longitud, el qual realitza una assimilació de dades dels models climàtics a partir d'observacions des del 1984 fins a l'actualitat (Kalnay et al., 1996). La resolució espacial d'aquestes dades és baixa, a causa de la gran extensió de terreny que comprèn, tot i que han servit per entendre de manera general l'evolució temporal de les temperatures de la zona. Finalment també s'ha calculat la radiació solar incident a l'àrea d'estudi a partir del càlcul del *Point Solar Radiation* amb el programari SIG ArcMap.

L'anàlisi del retrocés glacial s'ha dut a terme a partir de l'índex NDSI (*Normalized Difference Snow Index*) el qual mesura la magnitud relativa de la diferència de reflectància entre l'infraroig visible (verd), i l'infraroig d'ona curta (SWIR), permetent així diferenciar de manera clara el gel, i distingir-lo dels núvols (EOS, 2020).

$$NDSI = \frac{\text{Infraroig visible} - \text{Infraroig d'ona curta}}{\text{Infraroig visible} + \text{Infraroig d'ona curta}}$$

Seguint l'exemple de J. I. López-Moreno et al. (2014), es van discriminar els valors resultants de l'índex no compresos dins l'interval entre -1 i 0,4 (i.e. interval que presenta únicament píxels conformats per gel i neu). Aquest índex serví per poder delimitar les masses de gel dels diferents anys, les quals es van comparar amb els resultats de Cullen et al. (2013).

Finalment, a partir del programari RStudio (versió 1.4.1717) i Microsoft Excel (versió 19.0) es van relacionar les masses de gel amb la informació topogràfica anteriorment esmentada (i.e. altitud, pendent i orientacions), generant així diferents gràfics que faciliten la comprensió dels resultats obtinguts.

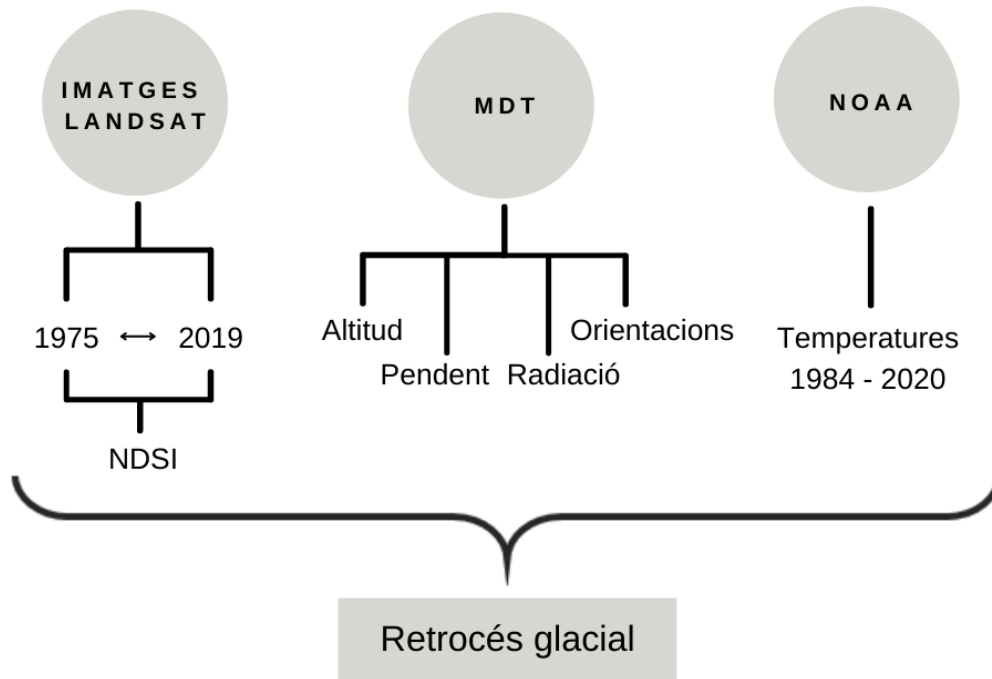


Figura 2. Esquema metodològic.

## 4. Resultats

### 4.1. Evolució de les glaceres del Kilimanjaro

La superfície de la capa de gel del Kilimanjaro ha patit una gran reducció des de l'any 1975 fins a l'any 2019 (Figura 3), una pèrdua total del 83,89% (Taula 2). Concretament, dels 5,66 km<sup>2</sup> de superfície de gel present l'any 1975, només resten 0,91 km<sup>2</sup> l'any 2019.

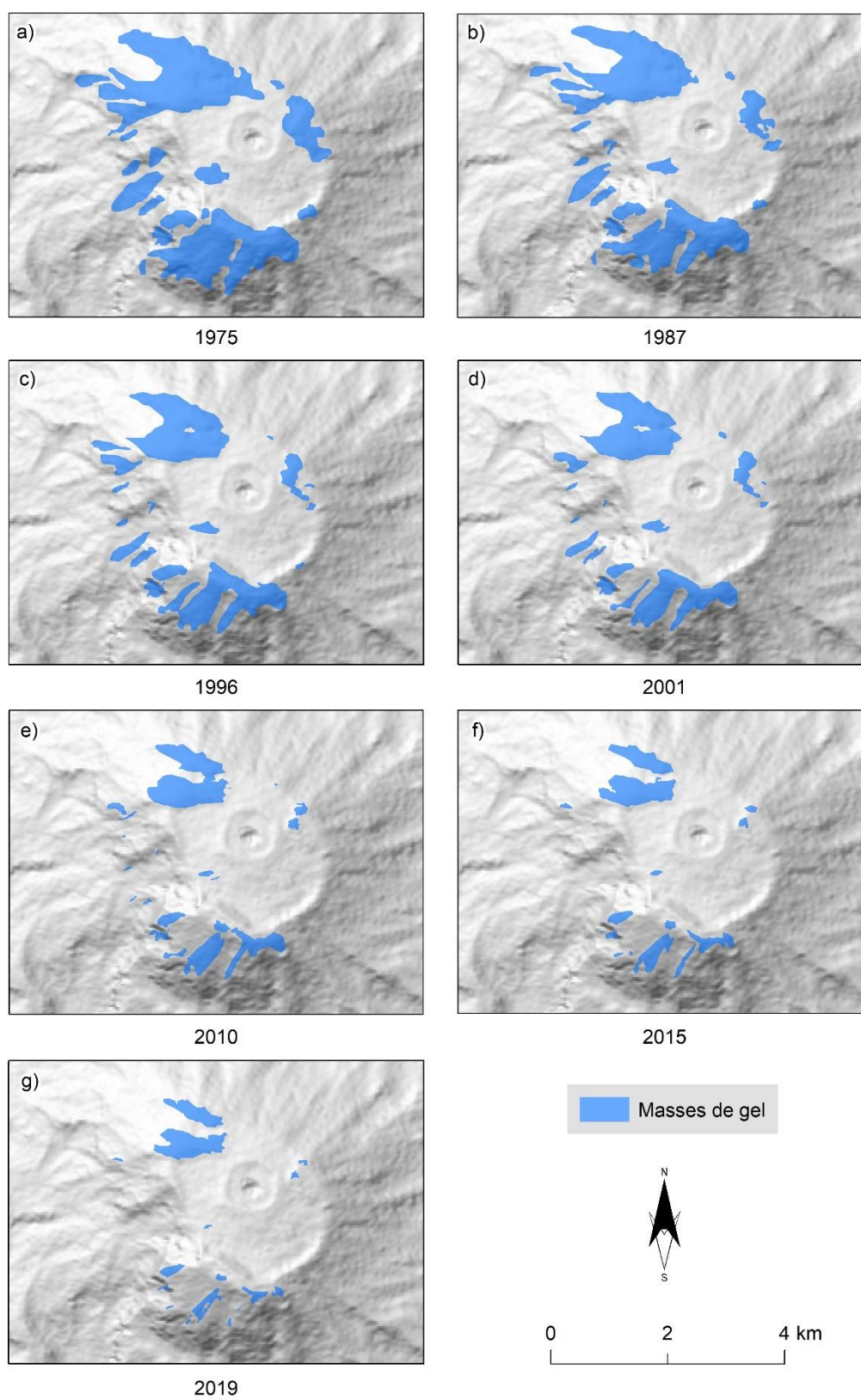
Aquesta reducció, gràcies al càlcul de la superfície glacial perduda a cada any respecte al seu any anterior, s'ha observat com ha anat augmentant progressivament al llarg del temps. Es passa d'un 22,98% l'any 1987 a un 27,49% l'any 2019. Aquest càlcul es veu condicionat pel nombre d'anys que comprèn l'interval de temps present entre les diferents imatges estudiades. Així, com menys anys hi ha entre les imatges, menys temps haurà transcorregut, fent que el valor de pèrdua de glaç sigui menor, a diferència dels grans intervals de temps entre les imatges (i.e. aquests presenten un valor de pèrdua més elevat). D'aquesta manera, és destacable el retrocés glacial que s'ha produït entre els anys 2015 i 2019, ja que tot i el breu interval de temps entre ambdues imatges (i.e. 4 anys), la reducció de glaç ha estat molt elevada. Per poder observar de manera més clara el progressiu grau de retrocés de les glaceres s'ha calculat la taxa anual de pèrdua per a cada any. Aquesta taxa demostra un

progressiu increment al llarg dels anys, assolint un màxim de 6,87% pel període comprès entre el 2015 i el 2019. Una taxa que als primers anys estudiats només arribava a l'1,91%, així, hi ha hagut un augment de la taxa anual de pèrdua de quasi un 5% entre el primer i el darrer any estudiat (Taula 2).

Època	Duració (anys)	Superfície total (km <sup>2</sup> )	Superfície perduda respecte a 1975 (%)	Superfície perduda respecte a la imatge anterior (%)	Taxa anual de pèrdua (%)
1975	-	5,66	-	-	-
1987	12	4,36	22,98	22,98	1,91
1996	9	3,24	42,67	25,57	2,84
2001	5	2,66	52,91	17,86	3,57
2010	9	1,71	69,74	35,74	3,97
2015	5	1,26	77,79	26,59	5,32
2019	4	0,91	83,89	27,49	6,87

**Taula 2.** Superfície total (km<sup>2</sup>) de les masses de gel del Kilimanjaro entre el període de 1975 - 2019. Càlculs del percentatge de pèrdua de gel respecte al primer any del període, del percentatge de pèrdua respecte a l'anterior data analitzada i la taxa anual perduda.

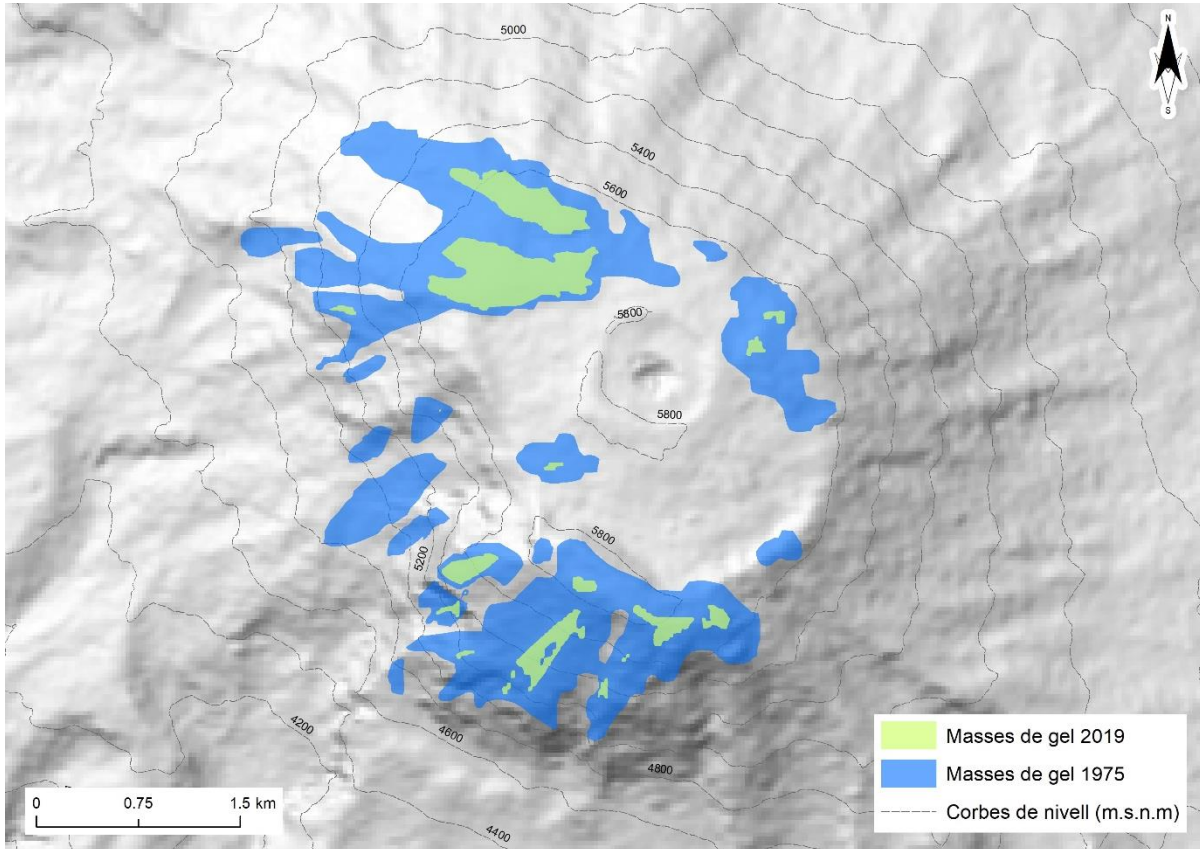
Aquest retrocés es pot analitzar també de forma espacial, a partir de la cartografia de les masses de gel en un període de quasi 45 anys (Figura 3). Entre els anys 1975 i 1987 ja s'aprecia una clara reducció en la mida de les glaceres tot que no es mostra cap ruptura important entre elles (Figura 3a i 3b). Aquesta reducció continua entre els anys 1887 i 1996, uns anys en els quals ja apareix un buit interior al cos de gel més gran ubicat al nord, i una divisió de la mateixa en dues masses més en el seu sector més sud-occidental (Figura 3b i 3c). Posteriorment, entre els anys 1996 i 2001 segueix el retrocés glacial i ja destaca la desaparició d'algunes masses de gel (Figura 3c i 3d), un moment en què la cobertura de gel perduda és d'un 52,91% respecte al 1975 (Taula 2). La pèrdua quasi total dels camps de gel dels sectors occidental i oriental del cim del Kilimanjaro succeeix entre els anys 2001 i el 2010 (Figura 3d i 3e), un moment en què les masses de gel del sud se separen i es forma un canyó al forat de la glacera del nord aparegut l'any 1996. Més endavant, la imatge de l'any 2015 mostra que s'ha produït en l'interval 2010 - 2015 una completa separació de la massa de gel nord en dos cossos de gel independents, i els ja separats anteriorment pateixen una reducció de la seva mida (Figura 3f i 3e). Finalment, entre els anys 2015 i 2019 continua la reducció i desaparició de les masses de gel (Figura 3f i 3g). A l'oest del Kilimanjaro no queden glaceres i apareix un considerable canyó a una de les masses del nord, juntament amb un buit interior a la glacera més gran del sud. Amb tot, la massa de gel restant és de 0,912 km<sup>2</sup>.



**Figura 3.** Evolució del retrocés glacial del Kilimanjaro pels anys: a) 1975 b) 1987 c) 1996 d) 2001 e) 2010 f) 2015 g) 2019.



Així, si es comparen les glaceres entre el primer (1975) i el darrer any analitzat (2019), es demostra un clar retrocés de la capa de gel del Kilimanjaro (Figura 4). Un retrocés que s'ha traduït en una pèrdua total de 4,7 km<sup>2</sup> de massa glacial. La figura 4 demostra com les masses de gel s'han mantingut més a la zona septentrional del Kilimanjaro, sector que – tot i també haver patit una clara reducció – no és tan pronunciada pel fet que ja des del primer any analitzat esdevenia la massa de gel més gran. En canvi, al sud i a l'oest les glaceres han patit una reducció més dràstica, on únicament queden alguns cossos independents.

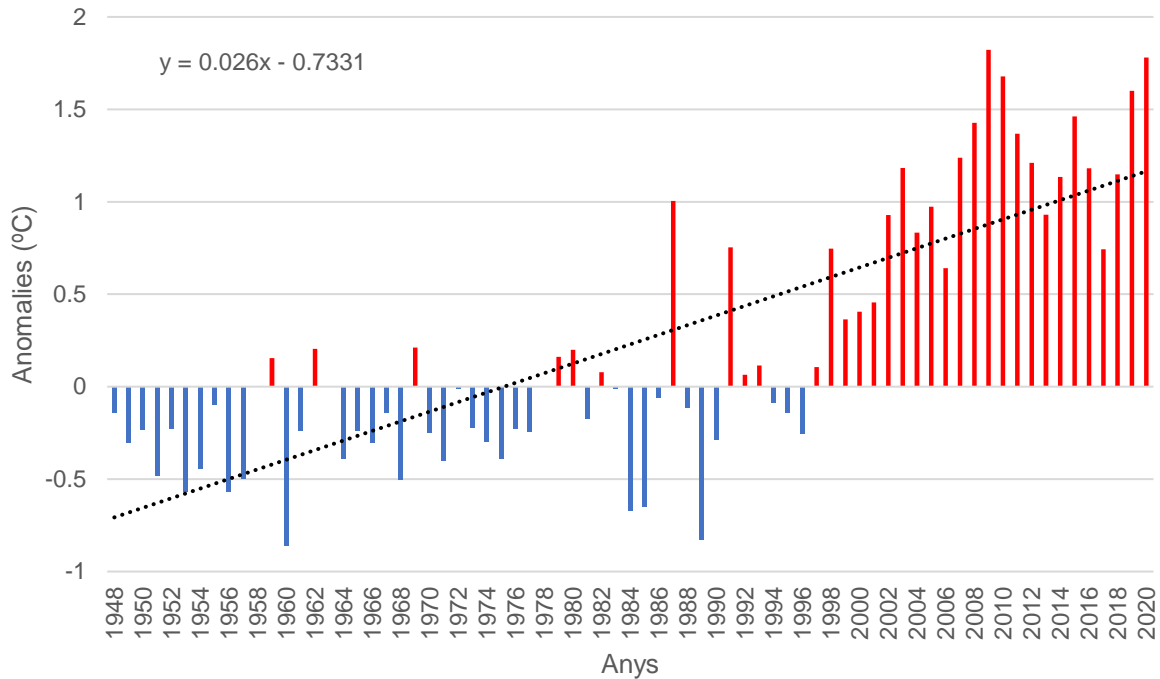


**Figura 4.** Mapa comparatiu de l'extensió de la capa de gel, extreta de l'anàlisi NDSI dels anys 1975 (blau) i 2019 (verd).

## 4.2. Influència de les temperatures al comportament de les glaceres

Les anomalies tèrmiques de la zona d'estudi dins el període comprès entre l'any 1948 i el 2020 mostren un augment positiu de les temperatures al llarg dels darrers vint anys (Figura 5). Des de l'any 1948 fins a aproximadament l'any 1985 hi ha hagut un clar predomini dels valors d'anomalia de caràcter negatiu, és a dir, uns anys que la temperatura anual ha estat més freda que la mitja del conjunt d'anys de l'interval estudiat. En canvi, a partir del 1985 destaca un clar predomini de valors d'anomalia positiva, fet que significa que la temperatura mitjana d'aquests anys s'ha situat per sobre de la mitjana del període. Cal destacar que les

anomalies de temperatura negatives no arriben mai a ser menors de  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a diferència de les anomalies de caràcter positiu, les quals puntualment arriben a sobrepassar els  $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Així, la tendència lineal demostra un progressiu augment de les temperatures a l'àrea d'estudi.



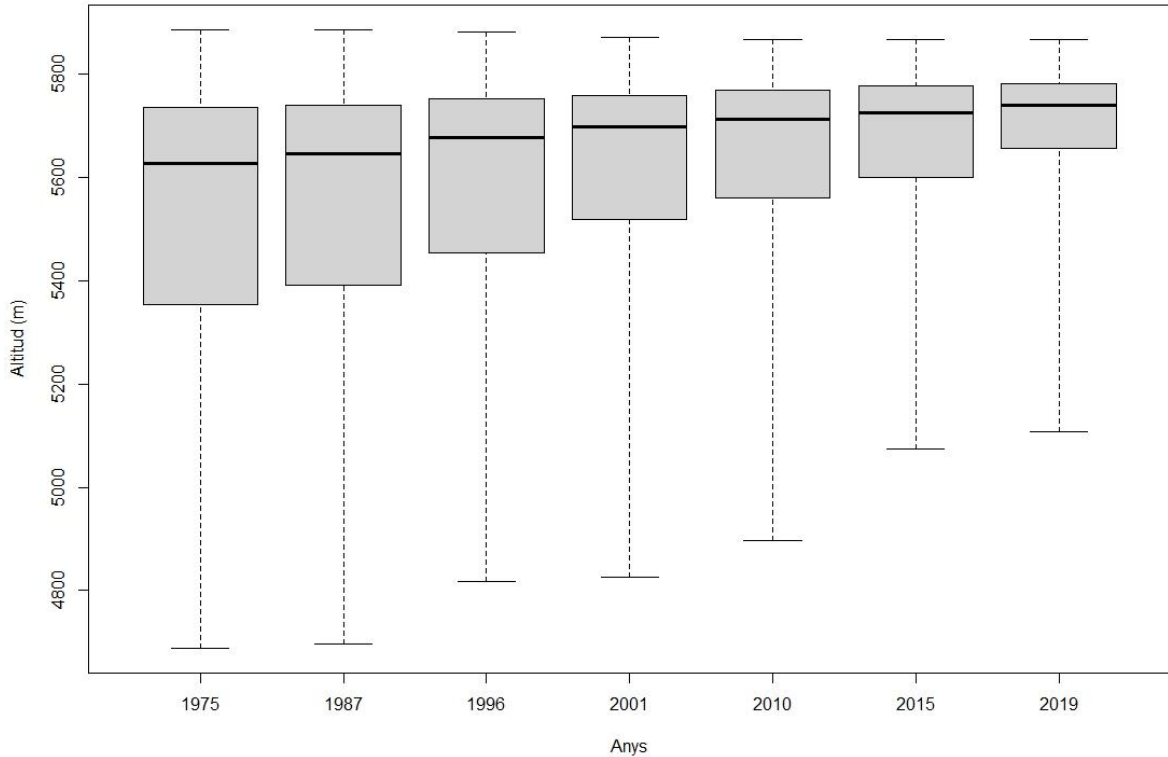
**Figura 5.** Evolució de les anomalies estandarditzades de la temperatura anual de la zona on es comprèn el Kilimanjaro (Tanzània), dels anys compresos entre el 1948-2020. Línia de tendència de tipus lineal amb seva respectiva equació.

### 4.3. Influència dels aspectes topogràfics al comportament de les glaceres

#### 4.3.1. Altitud

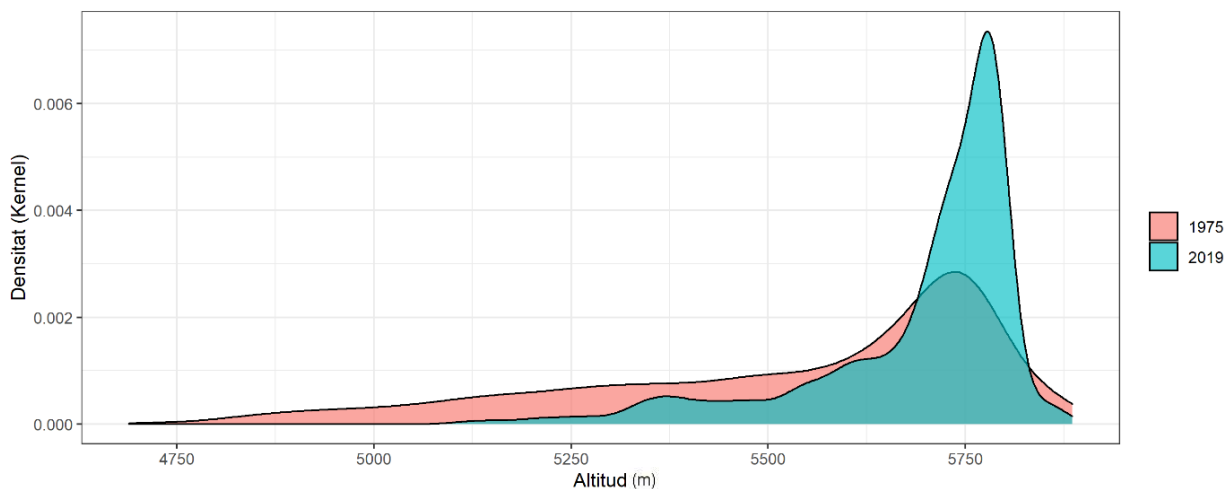
L'altitud és un dels factors que condiciona el retrocés de les glaceres. D'aquesta manera, el diagrama de caixes de la figura 6 mostra les relacions existents entre la variable altitud i la capa de gel, per cada un dels anys estudiats. L'altitud mitjana en què es localitzen les glaceres ha anat augmentat de forma progressiva, passant d'estar als 5600 metres d'altitud aproximadament, als 5700 metres. El 50% dels píxels de les glaceres de l'any 1975 es troben compreses aproximadament entre els 5360 i 5720 metres, uns valors que s'han anat concentrant al llarg dels anys arribant al 2019 amb el 50% de les masses de gel entre les altituds aproximades de 5630 i 5730 metres. Aquest fet demostra com el retrocés de les masses de gel es veu condicionat per l'altitud.





**Figura 6.** Diagrama de caixes (*boxplot*) que representa els valors de l'altitud dels píxels ocupats per gel en el Kilimanjaro per cada any analitzat en l'altitud (metres) en què es localitza. La línia negra indica la mitjana, les parts superior i inferior de la barra indiquen els percentils 75 i 25 respectivament.

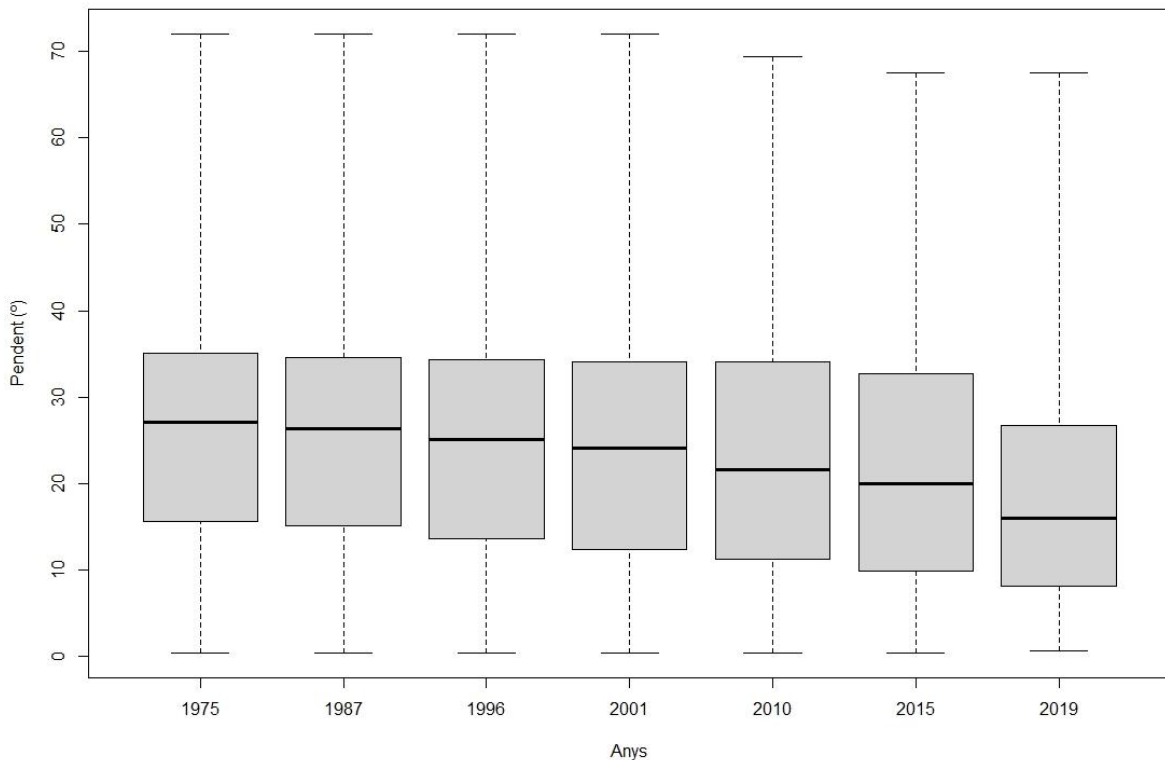
Aquestes relacions entre les masses de gel i l'altitud es fan evidents també a partir del gràfic de densitat de Kernel (Figura 7). Aquest mostra com en l'any 1975 la major part del gel estava compresa entre les altituds de 5600 i 5800 metres, amb un gran percentatge de píxels de gel situats per davall dels 5300 metres, arribant als 4750 metres. En canvi, l'any 2019 pràcticament no apareixen píxels de gel per davall dels 5300 metres d'altitud. Cal destacar també que el 1975 la densitat de cobertura de gel es trobava molt més repartida que en el 2019. De fet, l'any 1975, tot i que la major concentració de la capa de gel se situés sobre els 5750 metres, aquesta estava molt més dispersa. En canvi en el 2019, la massa de gel es troba pràcticament concentrada i restringida sobre els 5750 metres.



**Figura 7.** Gràfic de densitat de Kernel, de la distribució de les masses de gel depenent de l'altitud pels anys 1975 i 2019.

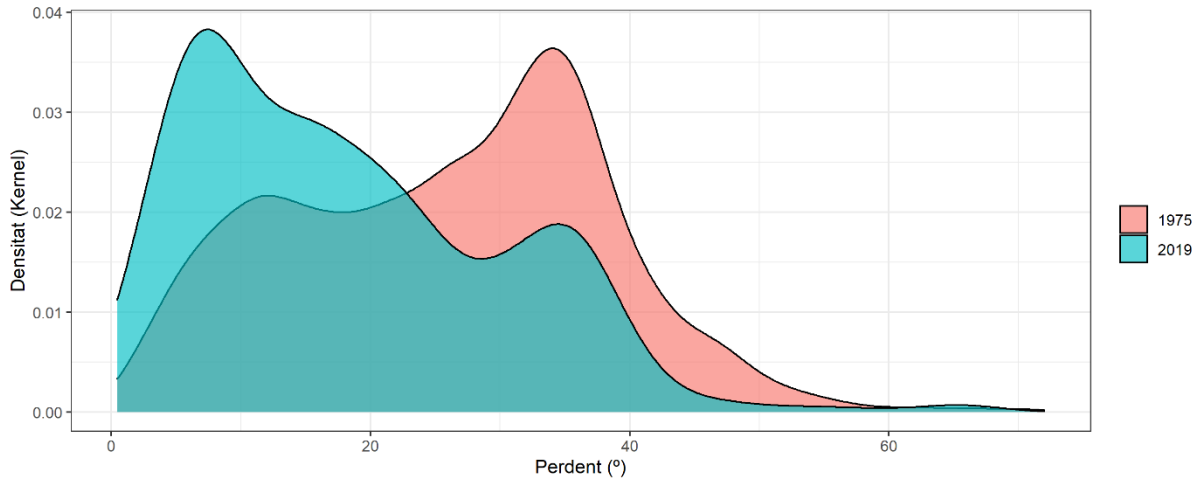
### 4.3.2. Pendent

Un altre factor que influeix en el comportament glacial és el pendent. L'anàlisi del diagrama de caixes de la figura 8, demostra les relacions existents entre el pendent i la distribució de les glaceres al llarg dels anys. Així, a mesura que han passat els anys, les masses de gel de les zones d'alt pendent són les que han patit un major retrocés. Per tant, a major grau de pendent, major fusió de gel. De fet, la mitjana de les masses de gel ha anat disminuint, passant de situar-se a zones amb un pendent al voltant dels 30 graus l'any 1975, a unes zones amb un pendent que ronda els 20 graus l'any 2019.



**Figura 8.** Diagrama de caixes (*boxplot*) que representa la capa de gel del Kilimanjaro per cada any analitzat i el pendent (graus) en què es localitzen. La línia negra indica la mitjana, el sector superior i inferior de la barra de la mitjana indiquen els percentils 75 i 25 respectivament.

El càlcul de la densitat de Kernel sobre la distribució de les masses de gel segons el pendent (Figura 9) també permet comprendre les relacions entre les glaceres i el pendent. Es presenta doncs una alta concentració general de les masses de gel a les zones amb un baix grau de pendent. Si es comparen els anys 1975 i 2019, ambdós tenen una clara concentració de les glaceres entre els 0 i els 35 graus de pendent. Així i tot, els màxims de densitat de l'any 1975 se situen als 35 graus, a diferència del 2019, un any en què el màxim es localitza entre el 5 i els 10 graus de pendent. Hi ha hagut doncs una gran pèrdua de massa de gel a les zones amb un pendent més acusat (i.e. observable a partir dels 20 graus de pendent). Per tant, l'any 2019 la major concentració de gel es troba a les zones de poc pendent (i.e. entre els 0° i els 20° aproximadament).



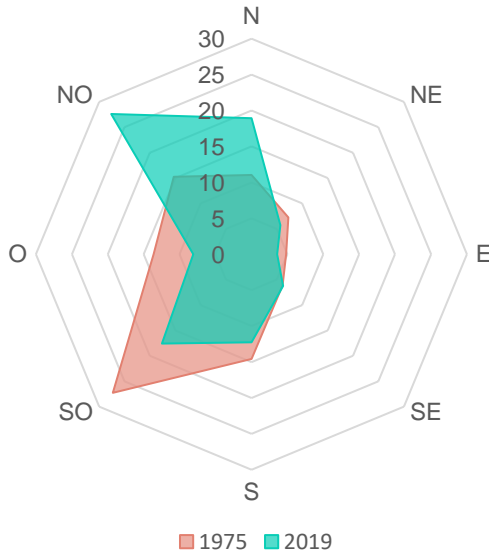
**Figura 9.** Gràfic de densitat de Kernel, de la distribució de les masses de gel depenent del pendent pels anys 1975 i 2019.

### 4.3.3. Orientacions i radiació solar incident

La radiació incident afecta de manera diferencial a cada una de les orientacions, fet que implica un comportament diferencial de les masses de gel. Cal destacar que la radiació, afecta les zones properes a l'equador de manera molt més regular, a diferència de la incident a les regions de latituds superiors, on hi trobem majors diferències. Aquest fet es deu que el Sol incideix de manera més perpendicular a les regions equatorials que no pas a les latituds més elevades (i.e. zones on el Sol incideix amb un major angle d'inclinació). Els glaciers del Kilimanjaro, situant-se a 3° de latitud sud, tot i no presentar diferències d'insolació tan grans com les glaceres de latituds més elevades, sí que presenten una diferència d'insolació afectant de manera diferencial per cada una de les orientacions. Fruit del càlcul del *Point Solar Radiation* s'ha estimat com el vessant nord presenta aproximadament una radiació de 2885516,34 WH/m<sup>2</sup>. En canvi, el vessant sud presenta una radiació d'1870951,18 WH/m<sup>2</sup>. Així, hi ha diferències entre ambdós vessants, sent el vessant nord el que presenta una major radiació incident

L'anàlisi del retrocés de les masses de gel per les diferents orientacions ha demostrat com aquestes s'han vist reduïdes principalment a la cara sud-oest (SO) (i.e. es passa d'un 27.3% l'any 1975 a un 17.6% l'any 2019). Així, les masses de gel han quedat pràcticament limitades al sector nord-oest (NO) (i.e. un 27.6% de les masses de gel l'any 2019 presenten aquesta orientació) (Figura 10, Taula 3).

Les comparacions de les orientacions entre el primer any analitzat (1975) i el darrer (2019) evidencien el canvi produït en la capa de gel del Kilimanjaro (Figura 10). Així, les orientacions predominants l'any 1975 eren les del SO, les quals s'han vist molt reduïdes, destacant en l'actualitat una major presència de masses de gel al sector NO. Hi ha hagut doncs una clara reducció del percentatge en orientacions compreses entre el S, SE i SO, i un augment a les regions del N, NE i NO. A més, tant a l'E com a l'O s'ha vist una reducció important en el percentatge de l'orientació.



**Figura 10.** Gràfic de la distribució de les masses de gel del Kilimanjaro de l'any 1975 i 2019 depenent de la orientació del terreny.

Orientació	1975	2019
N	11.0 %	18.9 %
NE	7.3 %	5.7 %
E	4.8 %	3.6 %
SE	6.1 %	6.2 %
S	14.6 %	12.3 %
S	27.3 %	17.6 %
W	13.6 %	8.1 %
NO	15.3 %	27.6 %

**Taula 3.** Percentatge de les masses de gel dels anys 1975 i 2019 per cada una de les orientacions del terreny.

## 5. Discussió

Els resultats obtinguts demostren una dràstica reducció de la superfície de la capa de gel del Kilimanjaro des de l'any 1975 fins a l'any 2019 amb una pèrdua total del 83,89%. Una pèrdua que ha anat augmentant al llarg del temps, passant d'una taxa anual de pèrdua d'1,91% als primers anys a un 6,87% els darrers. Aquest retrocés s'ha vist influït per factors com les temperatures, les altituds, els pendents i les orientacions. Així, l'augment generalitzat de les temperatures ha influït a la disminució de la massa de gel. A més, els sectors de menor altitud són els que també han sofert un major retrocés de la capa de gel juntament amb les zones de major pendent (i.e. ja que l'acumulació de neu en aquestes àrees és menor sent així les més exposades al desgel). Finalment les diferències de radiació per orientacions han demostrat una major radiació en els sectors N i un retrocés diferencial, sent els sectors SO els més afectats.

La radiació és un dels principals agents implicats en el balanç d'energia de les glaceres (Cullen et al., 2007; Oerlemans & Klok, 2002). Aquesta té una relació directa amb la fusió o sublimació del gel, i per tant esdevé un element clau en el retrocés de les masses de gel (Van De Berg et al., 2011). Com ja s'ha mencionat, els resultats demostren que la radiació és major al vessant N del Kilimanjaro, fet que hauria d'implicar que les masses de gel del nord fossin les que més s'han vist reduïdes. Emperò, això no és el que succeeix, ja que els sectors més afectats pel retrocés glacial són els del SO. Aquest fet es deu a la meteorologia local a partir de la formació de nívols, els quals proporcionen una alta protecció a les glaceres, fent que la intensitat de la radiació es vegi regulada pel patró estacional i diari de núvols (Mölg et al., 2003). El cicle diari de convecció de la zona central del continent africà provoca que durant els horabaixes (i.e. moment en què el Sol és situat a l'oest) hi hagi una clara presència de núvols. Durant els equinoccis (i.e. moment en què el Sol té més incidència en les latituds properes a l'equador) també destaca una elevada nuvolositat, un fet que no ocorre durant els

solsticis (i.e. moment en què el cim del Kilimanjaro sol estar lliure de nigs) (Mote & Kaser, 2007).

Per tant, el desgel es produeix per culpa de la radiació solar, juntament amb les condicions de vent molt flux, permetent així un desenvolupament d'aire calent per sobre de la capa de gel (Mote & Kaser, 2007). En tot aquest context, és destacable la presència al Kilimanjaro d'unes formacions de gel anomenades penitents, que indiquen un predomini de la sublimació (i.e. el pas d'estat sòlid a gasós) enfront de la fusió (i.e. el pas d'estat sòlid a líquid), i evidencien encara més l'important paper de la radiació solar en el desgel de les glaceres del Kilimanjaro (Mote & Kaser, 2007).

Aquest no és l'únic factor que implica un major retrocés de les glaceres del sud. El pendent també és un factor important. Així, les zones del sud són les que presenten un major pendent, sent els sectors de major pendent els que han patit un major retrocés. Altres factors com l'altitud i les temperatures també juguen un paper important en aquesta realitat. Com s'ha pogut observar, hi ha hagut un progressiu augment local de les temperatures al llarg del temps, fet que implica una major fusió de gel. Segons Mote & Kaser (2007), la temperatura de l'aire de les altituds on es troben les glaceres del Kilimanjaro sempre es troba per sota del punt de congelació, fet que complica que la capa de gel es fongui per calor sensible o per flux de calor infraroig. Així i tot, els resultats del present estudi han demostrat la forta influència de les altituds en el comportament de les glaceres. Considerant que a major altitud menor temperatura (Melendo et al., 2002), les glaceres que es trobaven ubicades a zones de menor altitud són les que – fruit de l'augment generalitzat de temperatures – han patit abans la presència temperatures més càlides, les quals juntament amb la influència de tots els altres factors, han implicat la fusió del glaç. Doncs, considerant que al sector sud és allà on els primers anys analitzats hi trobàvem les glaceres de menor altitud, aquestes han estat les primeres que s'han vist repercutides. Així i tot, cal considerar que segons Cullen et al. (2013), totes les masses glacials han patit un retrocés pràcticament constant al llarg del temps. D'aquesta manera, a part dels factors anteriorment esmentats, al sector nord del Kilimanjaro també queda més massa de gel ja que és el lloc on originàriament més n'hi havia.

El canvi climàtic és l'agent que ha comportat un augment de temperatures, les quals seguiran incrementant en el futur tant a escala global com local. Aquest augment està afectant directament a les glaceres de les zones muntanyoses provocant el seu desglaç (Kohler & Maselli, 2009). En aquest context, la criosfera de la muntanya és un dels sistemes terrestres més sensibles al canvi climàtic i on s'evidencien més els seus efectes (Kohler & Maselli, 2009). De fet, les glaceres proporcionen una visió avançada del que podria succeir en els ambients de les terres baixes, actuant així com uns sistemes d'alerta primerenca (Kohler & Maselli, 2009). Són molts els estudis que demostren el retrocés glacial de diferents llocs del món (e.g. Francou et al., 2003; J. I. López-Moreno et al., 2014; J. I. López-Moreno, et al., 2020; J. I. López-Moreno et al., 2020; Morán-Tejeda et al., 2018), una realitat que continuarà veient-se agreujada en el futur (e.g. Hock et al., 2019; Stadelmann et al., 2020). El Kilimanjaro és un exemple més d'aquesta realitat global, del qual nombroses contribucions han evidenciat l'estat crític de les seves glaceres i els pocs anys de vida que els hi resten (e.g. Bohleber et al., 2017; Cullen et al., 2006, 2013; Kaser et al., 2004). Aquest canvi climàtic persistirà i tendirà a augmentar agreujant així els seus efectes, fent que aquesta realitat de retrocés glacial en molts casos ja sigui irreversible (Huggel et al., 2019).

Són diverses les conseqüències que implica el retrocés de les glaceres sobre els diferents sistemes naturals i humans. Així, la capa de gel en les regions muntanyoses és un valuós recurs ecològic, hidrològic i socioeconòmic (Keller et al., 2005; Morán-Tejeda et al., 2016), i el seu retrocés està provocant canvis en les taxes d'erosió, de sediments i en el flux de nutrients. A més, també implica alteracions de la biogeoquímica dels rius i llacs glacials (M. Huss et al., 2017), influint a l'hàbitat i a les comunitats biòtiques a causa de l'alteració de les estructures biològiques d'aigua dolça (Hock et al., 2019). Aquesta disminució de la capa de gel conduirà també un escalfament de les muntanyes per sobre de la temperatura mitjana, ja que les superfícies sense neu són les que absorbeixen una major quantitat de radiació (Kohler & Maselli, 2009). En aquest context, cal destacar que quasi el 10% de la població mundial (i.e. 671 milions de persones) viu en regions d'alta muntanya, la majoria de les quals es troben a una distància inferior als 100 km de les glaceres (Hock et al., 2019). Així, la seva reducció implica l'exposició de la població enfront de diversos perills naturals causats per la caiguda de blocs, esclavissaments o inundacions sobtades dels llacs glacials (GLOF), uns perills que impliquen conseqüències greus a les poblacions de riu avall (Carrivick & Tweed, 2016; Haeberli et al., 2017; Huggel et al., 2019). L'agricultura, la producció d'energia o el turisme, també tenen com a factor clau la capa de gel permanent (Elsasser & Bärki, 2002; Huggel et al., 2019; Said et al., 2019). És més, d'acord amb les afirmacions de Hock et al. (2019), el retrocés dels glacials ha contribuït a la disminució localitzada dels rendiments agrícoles de les regions d'alta muntanya. Centrant-nos en el Kilimanjaro, la pèrdua de les seves glaceres no suposaria una elevada pèrdua en la contribució hídrica anual de la zona (Hemp, 2005). Així i tot, l'economia local es basa no només en l'agricultura, sinó també en el turisme, fent que la pèrdua de les glaceres suposi evidents impactes econòmics, juntament amb impactes ecològics, paisatgístics i culturals pel fet d'esdevenir un important element simbòlic per les poblacions locals (Said et al., 2019).

Tot i la gran importància de les glaceres, la problemàtica del seu retrocés generalitzat des de temps enrere no ha estat una qüestió posada en el punt de mira per part de les Nacions Unides. No fou fins a partir de la creació de la Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic (CMNUCC, 2021) en què es donà peu a valorar els impactes implícits en les pèrdues i danys del canvi climàtic. Concretament, a partir del *Warsaw International Mechanism* (WIM) ja es va fer una referència als processos físics de la criosfera de muntanya, identificant el retrocés de les glaceres juntament amb els seus impactes. Així, tenint en compte que la criosfera de la muntanya és un dels sistemes més sensibles al canvi climàtic (Huggel et al., 2019), la seva investigació esdevé avui en dia una acció molt important, la qual pot donar peu al desenvolupament i establiment de polítiques de pèrdues i danys, amb l'objectiu de mitigar els efectes que aquest escalfament causa sobre els sistemes de glaceres (Beniston et al., 2018). Per tant, aquest estudi esdevé una contribució més en la investigació de la criosfera de muntanya, sent d'utilitat per fomentar la consciència d'aquests canvis i per poder desenvolupar noves estratègies d'adaptació i mitigació enfront de les conseqüències que es poden produir en un futur vinent.

## 6. Conclusions

Les glaceres són un dels sistemes terrestres més sensibles al canvi climàtic i on s'evidencien més els seus efectes. Globalment, el seu retrocés implica greus conseqüències als sistemes naturals i humans, disminuint així els diversos beneficis que aporten. Les glaceres del Kilimanjaro són un exemple clar d'aquesta realitat global. Fruit de la seva anàlisi, s'ha pogut constatar una dràstica reducció de la superfície de gel des de l'any 1975 fins al 2019. La combinació dels factors com l'augment de temperatures, l'altitud, el pendent, les orientacions i la radiació solar incident han jugat un paper clau en el comportament temporal i espacial d'aquestes glaceres. Així, a major temperatura, major pendent i menor altitud, major fusió de la capa de gel. A més, les relacions entre orientacions i radiació han demostrat com en aquest cas el sector SO és el que més s'ha vist afectat, quedant-se les masses de gel pràcticament limitades al NO.

El retrocés glacial del Kilimanjaro no implica greus conseqüències quant a la contribució hídrica anual de la zona, encara que sí greus impactes turístics, ecològics, paisatgístics i culturals. Per tant, el present estudi esdevé una contribució més en la investigació de la criosfera de muntanya, aportant una actualització de l'estat de les masses de gel del Kilimanjaro, contribuint així en el seu coneixement. Es pretén fomentar la consciència d'aquesta realitat, podent ser d'ajuda per a l'establiment de polítiques efectives de mitigació dels efectes del canvi climàtic sobre les glaceres.

## 7. Agraïments

La realització d'aquest treball va dedicat a totes les persones que m'han ajudat al llarg de la seva elaboració, perquè així hagi pogut ser possible.

En primer lloc, voldria agrair al meu tutor del Treball de Final de Grau, el Dr. Enrique Morán Tejada. Sense la seva confiança, ajuda i col·laboració prestada, el resultat no hagués estat tan satisfactori. He passat molt de gust de treballar aquesta temàtica amb ell.

En segon lloc, voldria agrair a tots els professors de la Universitat de les Illes Balears, que han contribuït a l'assoliment dels meus coneixements geogràfics durant tota la carrera. Aquests han estat fonamentals per arribar a fer el present treball, formant-me així com a geògraf. De molts d'ells en guardaré un gran record.

En tercer lloc, vull donar les gràcies a tota la meva família pel suport i confiança que sempre han dipositat en mi, no tan sols en l'elaboració del Treball Final de Grau, sinó en el dia a dia. Fora ells no hauria pogut arribar fins aquí.

Finalment i fora menys importància, voldria agrair als meus amics i companys de classe, entre dels quals he de mencionar en Tòfol Rotger, fora ell aquests quatre anys del grau no haguessin estat el mateix, del qual n'estic molt agraït d'haver conegut, només puc agrair-li tota l'ajuda que m'ha prestat i les bones aventures que hem pogut compartir.

## 8. Bibliografia

- Agrawala, S., Moehner, A., Hemp, A., & Al, E. (2003). Development and climate change in Tanzania: focus on Mount Kilimanjaro. In *OECD*.
- Allen, M. R., Dube, O. P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., W. Cramer, S. H., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., & Zickfeld, K. (2018). Framing and Context Coordinating. In *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].
- Allison, E. A. (2015). The spiritual significance of glaciers in an age of climate change. In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* (Vol. 6, Issue 5, pp. 493–508). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/wcc.354>
- Almirón, A. (2007). Valorización turística de un área protegida. El caso del destino los glaciares en el extremo sur Patagónico. *Instituto de Investigaciones Geograficas de La Patagonia*, 6, 1–36.
- Almirón, A., Bertinello, R., & Troncoso, C. (2006). Turismo, patrimonio y territorio: Una discusión de sus relaciones a partir de casos de Argentina. *Estudios y Perspectivas En Turismo*, 15(2), 101–120.
- Anesio, A. M., Hodson, A. J., Fritz, A., Psenner, R., & Sattler, B. (2009). High microbial activity on glaciers: Importance to the global carbon cycle. *Global Change Biology*, 15(4), 955–960. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01758.x>
- Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L. M., Coppola, E., Eckert, N., Fantini, A., Giacomoni, F., Hauck, C., Huss, M., Huwald, H., Lehning, M., López-Moreno, J. I., Magnusson, J., Marty, C., Morán-Tejeda, E., Morin, S., Naaim, M., Provenzale, A., ... Vincent, C. (2018). The European mountain cryosphere: A review of its current state, trends, and future challenges. *Cryosphere*, 12(2), 759–794. <https://doi.org/10.5194/tc-12-759-2018>
- Bohleber, P., Sold, L., Hardy, D. R., Schwikowski, M., Klenk, P., Fischer, A., Sirguey, P., Cullen, N. J., Potocki, M., Hoffmann, H., & Mayewski, P. (2017). Ground-penetrating radar reveals ice thickness and undisturbed englacial layers at Kilimanjaro's Northern Ice Field. *Cryosphere*, 11(1), 469–482. <https://doi.org/10.5194/tc-11-469-2017>
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J., & Hofstede, R. (2006). Human impact on the hydrology of the Andean páramos. *Earth-Science Reviews*, 79(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002>
- Carrivick, J. L., & Tweed, F. S. (2016). A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. *Global and Planetary Change*, 144, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.07.001>
- Céleri, R., & Feyen, J. (2009). The hydrology of tropical andean ecosystems: Importance, knowledge status, and perspectives. *Mountain Research and Development*, 29(4), 350–355. <https://doi.org/10.1659/mrd.00007>
- CMNUCC. (2021). *Conferencia sobre cambio climático*. United Nations Climate Change. <https://unfccc.int/es/event/conferencia-sobre-cambio-climatico-mayo-junio-2021-sesiones-de-los-organos-subsidiarios> [Data d'accés: 07/06/21]



- CSI. (2018). *SRTM 90m DEM Digital Elevation Database*. <https://srtm.csi.cgiar.org/> [Data d'accés: 16/03/21]
- Cullen, N. J., Mölg, T., Kaser, G., Hussein, K., Steffen, K., & Hardy, D. R. (2006). Kilimanjaro Glaciers: Recent areal extent from satellite data and new interpretation of observed 20th century retreat rates. *Geophysical Research Letters*, 33(16), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2006GL027084>
- Cullen, N. J., Mölg, T., Kaser, G., Steffen, K., & Hardy, D. R. (2007). Energy-balance model validation on the top of Kilimanjaro, Tanzania, using eddy covariance data. *Annals of Glaciology*, 46, 227–233. <https://doi.org/10.3189/172756407782871224>
- Cullen, N. J., Sirguey, P., Mölg, T., Kaser, G., Winkler, M., & Fitzsimons, S. J. (2013). A century of ice retreat on Kilimanjaro: the mapping reloaded. *The Cryosphere*, 7(2), 419–431. <https://doi.org/10.5194/tc-7-419-2013>
- Elsasser, H., & Bürki, R. (2002). Climate change as a threat to tourism in the Alps. *Climate Research*, 20(3), 253–257. <https://doi.org/10.3354/cr020253>
- EOS. (2020). *NDSI*. Earth Observing System. <https://eos.com/make-an-analysis/ndsi/> [Data d'accés: 01/04/21]
- Epstein, P. R. (2001). Climate change and emerging infectious diseases. *Microbes and Infection*, 3(9), 747–754. [https://doi.org/10.1016/S1286-4579\(01\)01429-0](https://doi.org/10.1016/S1286-4579(01)01429-0)
- Erik Bjørndalen, J. (1992). Tanzania's vanishing rain forests - assessment of nature conservation values, biodiversity and importance for water catchment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 40(1–4), 313–334. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(92\)90100-P](https://doi.org/10.1016/0167-8809(92)90100-P)
- Faillettaz, J., Funk, M., & Vincent, C. (2015). Avalanching glacier instabilities: Review on processes and early warning perspectives. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 203–224. <https://doi.org/10.1002/2014RG000466>
- Francou, B., Vuille, M., Wagnon, P., Mendoza, J., & Sicart, J. E. (2003). Tropical climate change recorded by a glacier in the central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(5). <https://doi.org/10.1029/2002jd002959>
- Gabrielli, P., Hardy, D. R., Kehrwald, N., Davis, M., Cozzi, G., Turetta, C., Barbante, C., & Thompson, L. G. (2014). Deglaciated areas of Kilimanjaro as a source of volcanic trace elements deposited on the ice cap during the late Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 93, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.03.007>
- Gagné, K., Rasmussen, M. B., & Orlove, B. (2014). Glaciers and society: Attributions, perceptions, and valuations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(6), 793–808. <https://doi.org/10.1002/wcc.315>
- Haerberli, W., Schaub, Y., & Huggel, C. (2017). Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges. *Geomorphology*, 293, 405–417. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.009>
- Hardy, D. R. (2011). Kilimanjaro. In *Encyclopedia of Earth Sciences Series* (Singh, Vij, Vol. 58, Issue 12, pp. 7250–7257). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2\\_315](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2642-2_315)
- Hemp, A. (2005). Climate change-driven forest fires marginalize the impact of ice cap wasting on Kilimanjaro. *Global Change Biology*, 11(7), 1013–1023. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00968.x>
- Hemp, A. (2006). Continuum or zonation? Altitudinal gradients in the forest vegetation of Mt.

- Kilimanjaro. *Plant Ecology*, 184(1), 27–42. <https://doi.org/10.1007/s11258-005-9049-4>
- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B., & Steltzer, H. I. (2019). High Mountain Areas. In *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*.
- Hodson, A., Cameron, K., Bøggild, C., Irvine-Fynn, T., Langford, H., Pearce, D., & Banwart, S. (2010). The structure, biological activity and biogeochemistry of cryoconite aggregates upon an arctic valley glacier: Longyearbreen, Svalbard. *Journal of Glaciology*, 56(196), 349–362. <https://doi.org/10.3189/002214310791968403>
- Hoffmann, D. (2008). Consecuencias del retroceso glaciar en la Cordillera boliviana. *Pirineos*, 163(0), 77–84. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2008.v163.23>
- Huggel, C., Muccione, V., Carey, M., James, R., Jurt, C., & Mechler, R. (2019). Loss and Damage in the mountain cryosphere. In *Regional Environmental Change* (Vol. 19, Issue 5, pp. 1387–1399). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1385-8>
- Huss, M., Bookhagen, B., Huggel, C., Jacobsen, D., Bradley, R. S., Clague, J. J., Vuille, M., Buytaert, W., Cayan, D. R., Greenwood, G., Mark, B. G., Milner, A. M., Weingartner, R., & Winder, M. (2017). Toward mountains without permanent snow and ice. In *Earth's Future* (Vol. 5, Issue 5, pp. 418–435). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/2016EF000514>
- Huss, Matthias, & Hock, R. (2018). Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*, 8(2), 135–140. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- IPCC. (2013). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge
- IPCC. (2019). "Resumen para responsables de políticas". In *Informe especial sobre los océanos y la criosfera en un clima cambiante del IPCC* [H. O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (eds.)].
- Ives, J. D., Shrestha, R. B., & Mool, P. K. (2010). Formation of Glacial Lakes in the Hindu Kush-Himalayas and GLOF Risk Assessment. In *ICIMOD (International Centre for Integrated Mountain Development)*.
- Jurt, C., Burga, M. D., Vicuña, L., Huggel, C., & Orlove, B. (2015). Local perceptions in climate change debates: insights from case studies in the Alps and the Andes. *Climatic Change*, 133(3), 511–523. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1529-5>
- Kalnay, E., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Jenne, R., & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437–470. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- Kaser, G. (1999). A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 22(1–4), 93–103. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(99\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(99)00028-4)
- Kaser, G., Großhauser, M., & Marzeion, B. (2010). Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(47), 20223–20227. <https://doi.org/10.1073/pnas.1008162107>

- Kaser, G., Hardy, D. R., Mölg, T., Bradley, R. S., & Hyera, T. M. (2004). Modern glacier retreat on Kilimanjaro as evidence of climate change: Observations and facts. *International Journal of Climatology*, 24(3), 329–339. <https://doi.org/10.1002/joc.1008>
- Keller, F., Goyette, S., & Beniston, M. (2005). Sensitivity analysis of snow cover to climate change scenarios and their impact on plant habitats in alpine terrain. *Climatic Change*, 72(3), 299–319. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-5360-2>
- Kent, P. E. (1944). Kilimanjaro: An active volcano. *Nature*, 153(3885), 454. <https://doi.org/10.1038/153454a0>
- Kohler, T., & Maselli, D. (2009). Mountains and Climate Change - From Understanding to Action. In *Security*.
- Konchar, K. M., Staver, B., Salick, J., Chapagain, A., Joshi, L., Karki, S., Lo, S., Paudel, A., Subedi, P., & Ghimire, S. K. (2015). Adapting in the Shadow of Annapurna: A Climate Tipping Point. *Journal of Ethnobiology*, 35(3), 449–471. <https://doi.org/10.2993/0278-0771-35.3.449>
- Liévano, J. L. C., Murcia, C. E. R., & Nuñez, E. L. R. (2012). *Glaciares de Colombia. Más que montañas con hielo*. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.
- López-Moreno, J. I., Ceballos, J. L., Rojas-Heredia, F., Zabalza-Martinez, J., Vidaller, I., Revuelto, J., Alonso-González, E., Morán-Tejeda, E., & García-Ruiz, J. M. (2020). Topographic control of glacier changes since the end of the Little Ice Age in the Sierra Nevada de Santa Marta mountains, Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 104(April). <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102803>
- López-Moreno, J. I., Fontaneda, S., Bazo, J., Revuelto, J., Azorin-Molina, C., Valero-Garcés, B., Morán-Tejeda, E., Vicente-Serrano, S. M., Zubieta, R., & Alejo-Cochachín, J. (2014). Recent glacier retreat and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. *Global and Planetary Change*, 112, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.10.010>
- López-Moreno, J. I., Navarro, F., Izagirre, E., Alonso, E., Rico, I., Zabalza, J., & Revuelto, J. (2020). Glacier and climate evolution in the pariacacá mountains, Peru. *Geographical Research Letters*, 46(1), 127–139. <https://doi.org/10.18172/cig.4331>
- Martínez, J., & Bremauntz, A. F. (2004). *Cambio climático: una visión desde México* (Instituto Nacional de Ecología & S. del M. A. y R. Naturales (eds.)).
- Melendo, J. A., Nieves, S., Cobos, A., Cancar Pomar, L., Maza, P., Fernando, R., & Vitaller, L. (2002). *Manual de técnicas de montaña e interpretación de la naturaleza* (Primera). Paidotribo. <http://www.paidotribo.com>
- Mitchell, J., Keane, J., & Laidlaw, J. (2009). *Making success work for the poor: Package tourism in Northern Tanzania*.
- Mölg, T., Cullen, N. J., Hardy, D. R., Winkler, M., & Kaser, G. (2009). Quantifying climate change in the tropical midtroposphere over East Africa from glacier shrinkage on Kilimanjaro. *Journal of Climate*, 22(15), 4162–4181. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2954.1>
- Mölg, T., Hardy, D. R., & Kaser, G. (2003). Solar-radiation-maintained glacier recession on Kilimanjaro drawn from combined ice-radiation geometry modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(23). <https://doi.org/10.1029/2003jd003546>
- Morán-Tejeda, E., López-Moreno, J. I., Stoffel, M., & Beniston, M. (2016). Rain-on-snow events in Switzerland: Recent observations and projections for the 21st century. *Climate Research*, 71(2), 111–125. <https://doi.org/10.3354/cr01435>

- Morán-Tejeda, E., Luis Ceballos, J., Peña, K., Lorenzo-Lacruz, J., & López-Moreno, J. I. (2018). Recent evolution and associated hydrological dynamics of a vanishing tropical Andean glacier: Glaciar de Conejeras, Colombia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(10), 5445–5461. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5445-2018>
- Mote, P. W., & Kaser, G. (2007). The shrinking glaciers of Kilimanjaro: Can global warming be blamed? *American Scientist*, 95(4), 318–325. <https://doi.org/10.1511/2007.66.318>
- NOAA. (1994). *National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce*. /data/gridded/data.ncep.reanalysis.html [Data d'accés: 18/05/21]
- NSIDC. (2020). *What is a glacier? All About Glaciers*. <https://nsidc.org/cryosphere/glaciers/questions/what.html> [Data d'accés: 31/03/21]
- Oerlemans, J., & Klok, E. J. (2002). Energy Balance of a Glacier Surface: Analysis of Automatic Weather Station Data from the Morteratschgletscher, Switzerland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 34(4), 477–485. <https://doi.org/10.1080/15230430.2002.12003519>
- Olsson, L., Opondo, M., Tschakert, P., Agrawal, A., Eriksen, S. H., Ma, S., Perch, L. N., Zakieldeem, S. A., Cutter, S., Pignatelli, E., & Kaijser, A. (2014). Livelihoods and poverty. In *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415379.018>
- Otte, I., Detsch, F., Mwangomo, E., Hemp, A., Appelhans, T., & Nauss, T. (2017). Multidecadal Trends and Interannual Variability of Rainfall as Observed from Five Lowland Stations at Mt. Kilimanjaro, Tanzania. *Journal of Hydrometeorology*, 18(2), 349–361. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-16-0062.1>
- Paul, F., & Mölg, N. (2014). Hasty retreat of glaciers in northern Patagonia from 1985 to 2011. *Journal of Glaciology*, 60(224), 1033–1043. <https://doi.org/10.3189/2014JoG14J104>
- Poveda, G., & Pineda, K. (2009). Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates: Are they bound to disappear during the 2010-2020 decade? *Advances in Geosciences*, 22, 107–116. <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-107-2009>
- Rabatel, A., Ceballos, J. L., Micheletti, N., Jordan, E., Braitmeier, M., González, J., Mölg, N., Ménégoz, M., Huggel, C., & Zemp, M. (2018). Toward an imminent extinction of Colombian glaciers? *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 100(1), 75–95. <https://doi.org/10.1080/04353676.2017.1383015>
- Said, M., Komakech, H. C., Munishi, L. K., & Muzuka, A. N. N. (2019). Evidence of climate change impacts on water, food and energy resources around Kilimanjaro, Tanzania. *Regional Environmental Change*, 19(8), 2521–2534. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01568-7>
- Sarmett, J. D., & Faraji, S. A. (1991). The hydrology of Mount Kilimanjaro: An examination of dry season runoff and possible factors leading to its decrease. In *The Conservation of Mount Kilimanjaro* (Newmark, W, pp. 53–70). The IUCN Tropical Forest Programme.
- Serrano Cañadas, E. (2005). Glaciares, permafrost y cambio climático. *Sociedad Meteorológica de Cuba*, 20–26.
- Soruco, A., Vincent, C., Rabatel, A., Francou, B., Thibert, E., Sicart, J. E., & Condom, T. (2015). Contribution of glacier runoff to water resources of La Paz city, Bolivia (16° S). *Annals of Glaciology*, 56(70), 147–154. <https://doi.org/10.3189/2015AoG70A001>
- Stadelmann, C., Jakob Fürst, J., Mölg, T., & Braun, M. (2020). Brief communication: Glacier thickness reconstruction on Mt. Kilimanjaro. *Cryosphere*, 14(10), 3399–3406. <https://doi.org/10.5194/tc-14-3399-2020>

- Stibal, M., Šabacká, M., & Žárský, J. (2012). Biological processes on glacier and ice sheet surfaces. *Nature Geoscience*, 5(11), 771–774. <https://doi.org/10.1038/ngeo1611>
- Taylor, R. G., Mileham, L., Tindimugaya, C., & Mwebembezi, L. (2009). Recent glacial recession and its impact on alpine riverflow in the Rwenzori Mountains of Uganda. *Journal of African Earth Sciences*, 55(3–4), 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2009.04.008>
- UNESCO. (2020). *Kilimanjaro National Park*. World Heritage List. <https://whc.unesco.org/en/list/403/> [Data d'accés: 02/04/21]
- USGS. (2021). *EarthExplorer*. <https://earthexplorer.usgs.gov/> [Data d'accés: 01/03/21]
- Van De Berg, W. J., Van Den Broeke, M., Ettema, J., Van Meijgaard, E., & Kaspar, F. (2011). Significant contribution of insolation to Eemian melting of the Greenland ice sheet. *Nature Geoscience*, 4(10), 679–683. <https://doi.org/10.1038/ngeo1245>
- Veettil, B. K., & Kamp, U. (2019). Global disappearance of tropical mountain glaciers: Observations, Causes, and Challenges. *Geosciences (Switzerland)*, 9(5), 1–25. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050196>
- Vergara, W., Deeb, A. M., Valencia, A. M., Bradley, R. S., Francou, B., Zarzar, A., Grünwaldt, A., & Haeussling, S. M. (2007). Economic impacts of rapid glacier retreat in the Andes. *Eos*, 88(25), 2–4. <https://doi.org/10.1029/2007EO250001>
- Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Elison Timm, O., Condom, T., Salzmann, N., & Sicart, J. E. (2017). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, 176, 195–213. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>
- Welling, J. T., Árnason, Þ., & Ólafsdóttir, R. (2015). Glacier tourism: a scoping review. *Tourism Geographies*, 17(5), 635–662. <https://doi.org/10.1080/14616688.2015.1084529>
- WGMS. (2008). *Global Glacier Changes: facts and figures*.