

Dél-amerikai jégárak felszíni sebességének vizsgálata objektumkövető algoritmus alkalmazásával¹

JÓ VIVIÁNA

1. Bevezetés

Földünk legjobb klímajelzői közé tartoznak a gleccserek. Jelenlétük, kiterjedésük, térfogatuk, mozgási sebességük és ezek megváltozásainak vizsgálatával egy terület környezeti átalakulásának mértékét tudjuk nyomon követni és előre jelezni.² A jégárak azonban kimagasló klímajelző szerepük mellett Földünk bizonyos területein társadalmi jelentőséggel is bírnak. Ilyen a Száraz-Andok térsége is, ahol a felszíni és felszín alatti jég olvadásából származó édesvíz létfontosságú az ott élők számára. Így a jégárak vizsgálata a globális klímaváltozás és a potenciális ivóvízkészletek felmérésének szempontjából is jelentős.^{3, 4} A gleccserek kiterjedésének vizsgálatára számos adatbázist hoztak már létre a kutatók. Ma már a műholdfelvételek segítségével, automatizáltan lehet a gleccsereket felismerni.⁵ Ezen adatbázisok globális léptékben alkalmasak a gleccserek kiterjedésének vizsgálatára, de lokálisan sok hibát tartalmaznak, melyek a hó, törmelék, állóvíz és árnyékolt területek gleccserjégtől való nehézkes elkülönítéséből fakadnak.⁶ Ezen adatbázisok pontosításában a mozgás vizsgálata segíthetne,

¹ Szeretném megköszönni témavezetőim, Dr. Ignéczi Ádám, Dr. Mari László és Dr. Nagy Balázs segítségét, akik hozzásegítettek a kutatás elvégzéséhez, a kapott eredmények értelmezéséhez. Külön köszönöm Dr. Ignéczi Ádámnak, hogy a nagy gépkapacitást igénylő számításokat elvégezte a University Of Sheffield Intézetben és a kapott adatokat átadta részemre. Köszönöm a Permachile+ Programnak, ahol lehetőséget kaptam egy kutatócsoport munkájába való bekapcsolódásra és a kutatásaikhoz kapcsolódó téma feldolgozására, elemzésére. Végül, de nem utolsónak köszönöm Dr. Telbisz Tamásnak, hogy a tanulmányt átolvasta és építő jellegű kritikáit megfogalmazta azzal kapcsolatban.

² VINCENT et al. (2009)

³ BRAVO et al. (2017)

⁴ IPCC (2019)

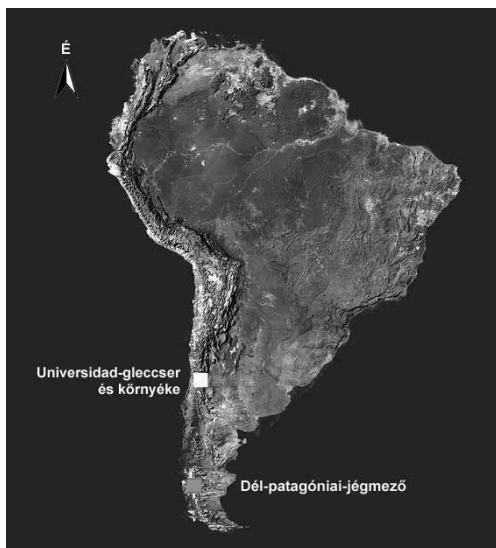
⁵ RAUP et al. (2007)

⁶ RACOVITEANU et al. (2009)

melynek megléte vagy éppen hiánya egyértelműen segít elkülöníteni a mozgásban lévő gleccsereket más nem mozgásban lévő formáktól.⁷ A gleccserek mozgásának vizsgálatával tehát a környezeti átalakuláson túl a későbbiekben a gleccseradatbázisok pontosítását is elvégezhetnénk. Kutatásom során objektumkövető algoritmussal vizsgáltam dél-amerikai jégárakat, mely képes azok felszíni sebességének detektálására. A módszer alkalmazásával lehetőségem nyílt annak működését elemezni, előnyeit és hátrányait megismerni.

2. Vizsgált területek bemutatása

Kutatásom vizsgálati területét a Dél-patagóniai-jégmező és az Andok déli vonulatában elhelyezkedő Universidad-gleccser és környéke képezte (1. ábra). A vizsgált területek kiválasztása egy dél–észak irányú szelvény mentén történt meg. Így lehetőségem nyílt délről, a nagy kiterjedésű, gyors mozgásban lévő gleccserektől elindulva haladni az északabbra fekvő, kisebb kiterjedésű, lassabban mozgó gleccserek irányába. A mintaterületek továbbá eltérő éghajlati és topográfiai adottságokkal bírnak, így az ezekből fakadó sajátosságok is vizsgálhatóvá váltak.



1. ábra: A vizsgált területek elhelyezkedése a Science Photo Library után módosítva.

⁷ LUCKMAN et al. (2003)

2.1. A Dél-patagóniai-jégmező

A patagóniai jégmező két területre különül el, az Észak- és Dél-patagóniai-jégmezőre. Ezen területek együttesen alkotják Földünk egyik legjelentősebb eljegesedett térségét. Kiterjedésük összesen 17000 km², mellyel az Antarktisz után a déli félteke második legnagyobb gleccserterületét képezik, 118 jégárral.⁸ Az itt található gleccserek megfigyelésének fontosságát a kutatók jó ideje felismerték, így a terület klímaváltozás következtében történő átalakulását már több, mint fél évszázada figyelik.^{9, 10, 11, 12} A Dél-patagóniai-jégmező a d.sz. 48° és 58° között helyezkedik el, tehát nagyjából 350 kilométer hosszan nyúlik el észak-déli irányban. Kelet-nyugati irányban legszélesebb részén 60 kilométer, legkeskenyebb részén alig 10 kilométer széles. Területe meghaladja a 13000 km²-t, így a patagóniai jégmező jelentős részét, több mint 75 %-át teszi ki.^{13, 14} A jégmező gleccsereinek kiterjedését számos kutató vizsgálta már. ANIYA és munkatársai¹⁵, továbbá RIVERA és munkatársai¹⁶ a legkorábbi elérhető feljegyzések, katonai térképek és a területről készült első légifotók segítségével végezték el a jégárak kiterjedésének rekonstruálását az elmúlt évszázadra. A Dél-patagóniai-jégmező gleccsereinek mozgásának tanulmányozásakor figyelembe kell venni, hogy azok a jégmező keleti oldalán proglaciális tavakba, míg nyugati oldalán a tengerbe torkollanak. Ez a jelenség nagyban befolyásolja mozgási sebességüket, melyet 2015-ig csak részleteiben vizsgáltak a kutatók. 2015-ben MOUGINOT és RIGNOT¹⁷ a jégmező teljes területére végeztek számításokat 1994 és 2014 közötti időszakra. Az általuk publikált eredmények lehetővé teszik, hogy az elmúlt öt év változásait megfigyeljük, és a 2019-es évre végzett új vizsgálatok során tapasztalt jelenségeket összehasonlítsuk korábbi megállapításaikkal. A Dél-patagóniai-jégmező vizsgálata két ütemben történt meg, melynek során először a jégmező egy szűkebb területére, a Jorge Montt-gleccser és környezetére helyeződött a fókusz. Erre a módszer tesztelése

⁸ RIVERA et al. (2012)

⁹ NICHOLS és MILLER (1952)

¹⁰ MERCER (1964)

¹¹ MERCER (1965)

¹² MERCER (1968)

¹³ ANIYA et al. (1992)

¹⁴ ANIYA et al. (2000)

¹⁵ ANIYA et al. (1992)

¹⁶ RIVERA et al. (2012)

¹⁷ MOUGINOT és RIGNOT (2015)

végett volt szükség, mivel a módszer eredetileg poláris területekre íródott és Dél-Amerika területén még nem tesztelték korábban. A szűkebb területen végzett első vizsgálathoz ideális választás volt a jégmező északi része, a Jorge Montt-gleccserrel a középpontban, mely jól reprezentálja a térséget. A módszer sikeres működését követően a vizsgálat második ütemében az algoritmus már a jégmező teljes területére lett lefuttatva.

2.2. Az Universidad-gleccser és környéke

Chilén keresztül húzódik az Andok hegyvonulatának déli szakasza, amely több helyen is meghaladja a 6000 méteres tengerszint feletti magasságot. A helyi lakosság számára a magashegységi területeken télen felhalmozódott hó nyári olvadásából származó édesvíz szolgáltatja az ivóvízkészletek jelentős százalékát. Ezek elolvadását követően a csapadékban szegény nyári időszak hátralévő részében a gleccserek olvadékvize látja el ugyanezt a feladatot. Az itt található gleccserek állapotának felmérése, változásuk nyomon követése a környezeti átalakulás mértékének felbecslése mellett tehát társadalmi fontossággal is bír.¹⁸ Az Universidad-gleccser és környéke az északi Száraz-Andok és a déli Nedves-Andok határán fekszik. Elhelyezkedése részben felelős a csapadékmennyiség nagy mértékű fluktuációjáért.¹⁹ A patagóniai jégmezőhöz hasonlóan a kutatók ezen terület gleccsereit is régóta vizsgálják. LE QUESNE és munkatársai²⁰ fa-évyűrű vizsgálatok segítségével az egykori csapadékmennyiséget, történelmi feljegyzések és korai felvételek felhasználásával pedig a gleccserek egykori kiterjedését rekonstruálták 1290-től 1999-ig. Kutatásuk kimutatta, hogy a gleccserek kiterjedése az évszázadok során szorosan követte a csapadékmennyiség változását, a megnövekedett csapadék hatására a gleccserek kiterjedése is nőtt, míg a csapadékmennyiség csökkenésével a gleccserek kiterjedése is csökkent. Az Universidad-gleccser a térség egyik legnagyobb jégára (32 km²), mely Chile fővárosától, Santiagótól 100 kilométerre délre található.²¹

3. Alkalmazott módszerek és adatok

3.1. Domborzat tanulmányozása

A gleccserek sebességét és mozgását alapjaiban meghatározza a vizsgálni kívánt terület domborzata, melyet érdemes minél részletesebb felbontású adatok

¹⁸ BRAVO et al. (2017)

¹⁹ BRAVO et al. (2017)

²⁰ LE QUESNE et al. (2009)

²¹ WILSON et al. (2016)

felhasználásával megvizsgálunk. Alapvetően négy fontos paramétert célszerű vizsgálni, melyek egy gleccser kiterjedésének, mozgásának és sebességének alakulásában nagy szerepet játszanak. Ezek a magassági-, lejtőszög-, lejtőkitettség- és görbületi értékek.²² A magassági értékek vizsgálatával jól lehatárolható a gleccserek magasság szerinti előfordulása, továbbá az értékek segítségével kiszámolhatjuk egy gleccser területének legmagasabb és legalacsonyabb pontja közti különbséget, melyet reliefnek nevezünk. A relief értékek növekedésével feltételezhetjük a gleccser mozgásának gyorsulását, míg alacsony relief értékek esetén lassabb mozgást várhatunk. A lejtőszög értékek megmutatják a vizsgált terület lejtőinek meredekségét, melyet a vízszinteshez képest bezárt szög meghatározásával kapunk meg. A lejtőszög értékeknél a reliefhez hasonlóan azt várjuk, hogy azok növekedésével a gleccser sebességének növekedését fogjuk tapasztalni. A lejtőkitettség az adott terület égtáji irányultságát adja meg, így értékei 0–360° között lehetnek, ahol 0° északi, 90° keleti, 180° déli és a 270° pontosan nyugati irányultságot jelent. Egy gleccser irányultsága szintén nagy hatással lehet annak mozgására és sebességére is. A Nap sugarai a déli féltekén a lejtők észak – észak-nyugati oldalát fogják tovább melegíteni, ahol így nagyobb mennyiségű olvadákvíz keletkezhet, mely a mozgás felgyorsulásához vezethet. A nullához közeli görbületi értékek kirajzolják az egyes gleccserek területét. A jégárak környező területeiről további információkkal szolgálhat a görbület, mivel a homorú területeken a hó becsapdázódhat és jobban táplálhatja a gleccser akkumulációs területét, ami a gleccser növekedéséhez és gyorsulásához vezethet.²³

Kutatásomban harminc méter felbontású SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) adatok segítségével vizsgáltam a Dél-patagóniai-jégmező és az Universidad-gleccser és környékének magassági viszonyait, lejtőszög, kitettség és görbületi értékeit, melyeket az ArcGIS 10 szoftver segítségével számoltam ki. Az SRTM adatbázis az Amerikai Egyesült Államok Geológiai Szolgálatának (USGS) honlapjáról ingyenesen letölthető bárki számára. Az adatbázist 2000. februárját követően hozták létre, miután a NASA Endeavour űrrepülőgéppel felmérték Földünk felszínét az északi szélesség 60. fokától a déli szélesség 57. fokáig.²⁴

3.2. GLIMS adatbázis

A gleccserek mozgásának és sebességének vizsgálatához szükségünk van az adott gleccser területének lehatárolására. A GLIMS (Global Land Ice Measurements

²² JANKE (2013)

²³ JANKE (2013)

²⁴ RODRIGUEZ et al. (2006)

from Space) adatbázis műholdfelvételek alapján készül, automatikus gleccserfelismerő programok segítségével. Az adatbázisból kiválaszthatjuk a vizsgálati területünket és hogy mely év gleccserkörvonalait szeretnénk letölteni. Az adatbázis (<http://glims.colorado.edu/glacierdata>) segítségével továbbá lehetőségünk nyílik globálisan nyomon követni a gleccserek kiterjedésének változását, de lokálisan sok hibával találkozhatunk.²⁵ Kutatásom során a vizsgált területekre elérhető legfrissebb gleccserkörvonalakat használtam fel, melyek 2016-os és 2018-as évek felvételei alapján készültek.

3.3. Feature és Speckle Tracking

A Feature és Speckle Tracking módszerek két kép keresztkorrelációján alapulnak. A módszer egy objektumkövető algoritmus alapján működik, mely képes két felvétel (pl. műholdfelvétel, radarfelvétel) közös pontjainak, radarfelvételek esetén közös jellemzőinek is (fizikai paraméterek, mint például nedvességtartalom) a megkeresésére és azok egymáshoz viszonyított elmozdulásának meghatározására. Ezt követően a felvételek elkészítésének ideje alapján az elmozduláshoz sebességet is rendel. A módszer segítségével tehát képesek vagyunk mozgásban lévő felszíninformák elmozdulásának irányát és sebességét detektálni.²⁶ A Feature Tracking során felhasználhatunk légifelvételeket, műholdfelvételeket, de kamerával készített földi fényképeket is az általunk vizsgálni kívánt területről. Minden felvétel esetén az első és legfontosabb lépés a felvételek pontos egymáshoz illesztése. A műholdfelvételek például a műholdak eltérő pályájából adódóan sosem fednek át egymással teljes egészében.²⁷ A Speckle Tracking módszer a Feature Tracking módszerhez hasonlóan működik, azonban radarfelvételeket használ fel a számítások során. Glaciális területek esetén célszerű a két módszer együttes alkalmazása, melyek jól kiegészíthetik egymást. A Feature Tracking jól alkalmazható, ha a vizsgálni kívánt területeinken elegendő mennyiségű objektum (terep-tárgy) látható a teljes vizsgálati időszakban. Egy gleccser esetében a tereptárgyak lehetnek gleccserhasadékok, moréna anyagok, vagy valamilyen egyéb törmelék a jégár felszínén. A hó azonban időszakosan befedheti ezen látható objektumokat, míg a magasabban fekvő területeken akár állandóan eltakarhatja azokat. Ilyen esetben a Feature Tracking módszer nem lesz képes mozgást kimutatni. A nagyfelbontású radarfelmérésekből származó felvételek, mint a SAR (Synthetic-aperture radar) felvételek is, segíthetnek abban, hogy hóval fedett területeket is

²⁵ RAUP et al. (2007)

²⁶ TUCKETT et al. (2019)

²⁷ LUCKMAN et al. (2003)

vizsgálni tudjunk. A radarfelvételek esetén fizikai tulajdonságok is képezhetik a követhető objektumokat, melyek így megfelelő azonosítási pontokat adhatnak a látható tereptárgyak hiányakor is. Ezek alapján a Feature Tracking módszert tehát érdemes hóval nem fedett területeken, vagy melegebb időszakokban alkalmazni, mikor a hótakarás minimális lesz. Míg a Speckle Tracking módszert célravezetőbb éppen a hidegebb időszakokban alkalmazni, mikor is a mérhető fizikai paraméterek állandóbbak, az olvadékvíz hiányában azok nem változnak meg túl gyorsan.²⁸ A kutatás során egy publikált keresztkorrelációs algoritmust alkalmaztunk, mely tartalmazza a radarfelvételek elő- illetve utósűrűsítését (részelek: TUCKETT et al. 2019). A módszerrel kapott eredmények Sentinel 1 SAR felvételek felhasználásával lettek előállítva. A módszer algoritmusát a University of Sheffield és a University of St. Andrews intézetekben dolgozták ki, és elsőként az antarktiszi jégtakaró peremi gleccserein alkalmazták.²⁹ A módszer első sorban antarktiszi területek vizsgálatára készült, ezért az, hogy dél-amerikai gleccserterületeken alkalmazzuk, átdolgozást igényelt. Tracking módszereket a kutatók már több mint két évtizede alkalmaznak glaciális területek felméréseinek céljából.^{30, 31, 32, 33, 34, 35, 36} A módszer az évek során rengeteget fejlődött, minek köszönhetően egyre kisebb változásokat is vizsgálhatunk vele. A University of Sheffield és a University of St. Andrews intézetekben kidolgozott új algoritmus érdekessége – melynek egy része szabadon is hozzáférhető (<https://topex.ucsd.edu/gmtsar>) –, hogy a két módszert elsőként együttesen alkalmazza.

4. Eredmények

4.1. A vizsgált területek domborzata

4.1.1. A Dél-patagóniai-jégmező domborzata

A Dél-patagóniai-jégmező észak-dél irányban megnyúlt alakja és középső fennsíki területe jól kirajzolódik magassági értékei alapján. A terület jelentős szintkülönbséggel rendelkezik, legmagasabb és legalacsonyabb pontja között

²⁸ SHORT és GRAY (2004)

²⁹ TUCKETT et al. (2019)

³⁰ ROLSTAD et al. (1997)

³¹ MOHR et al. (1998)

³² FREZZOTTI et al. (1998)

³³ CSATHÓ et al. (1999)

³⁴ BAMBER et al. (2000)

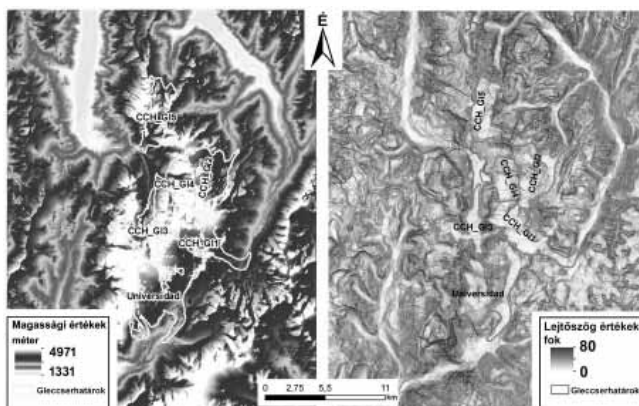
³⁵ JOUGHIN et al. (2004)

³⁶ LIU et al. (2007)

3475 méter különbség van. A gleccserek területén az átlagos lejtőszög értékek 5-10° körül alakulnak, a legnagyobb lejtőszög értékek a gleccserek területéből kibukkanó kárgerincek területén voltak mérhetők. A jégmező lejtőkitettsége térképe jól mutatja az észak-dél irányban, a teljes területen végig húzódó gerinc helyzetét, mely alapvetően két részre különíti el a jégmezőt. A gerinctől keletre a gleccserek irányultsága alapvetően északkelet, kelet és délkelet, míg a gerinctől nyugatra északnyugat, nyugat és délnyugat irányok dominálnak. A Jorge Montt-gleccser egyik oldalhoz sem sorolható, irányultsága erősen északi. A görbületi értékek jól megmutatják az egyes gleccserek területének határát és a környező völgyek és gerincek elhelyezkedését.

4.1.2. Universidad-gleccser és környékének domborzata

Az Universidad-gleccser és környékének domborzata (2. ábra) teljesen eltér a Dél-patagóniai-jégmező területétől. A gleccserek 4971 méteres magasságot is elérnek, és 2444 méteres magasságig nyúlnak le. A legnagyobb lejtőszög értékek az előző mintaterülethez hasonlóan 70° körül alakulnak, az átlagos lejtőszög értékek már jóval magasabbak, mint a jégmezőn mért értékek, 15-22° között mozognak. Ennek oka, hogy itt a Dél-patagóniai-jégmezőnél jóval több kárgerinc és kárfülke tarkítja a gleccserek területét. A lejtőkitettség alapján nem csoportosíthatók a gleccserek, azok nagyon változatos irányultságot mutatnak. Az Universidad-gleccser területét határozza meg egyedül a kelet, délkeleti kitettség. A görbületi térkép a Dél-patagóniai-jégmezőhöz hasonlóan jól kirajszolja az egyes gleccserek határát. A domborzat összességében sokkal összetettebbnek bizonyult a Dél-patagóniai-jégmezőhöz képest.



2. ábra: Az Universidad-gleccser és környékének magassági- és lejtőszög viszonyai.

4.2. Feature és Speckle Tracking

4.2.1. A Dél-patagóniai-jégmező sebessége

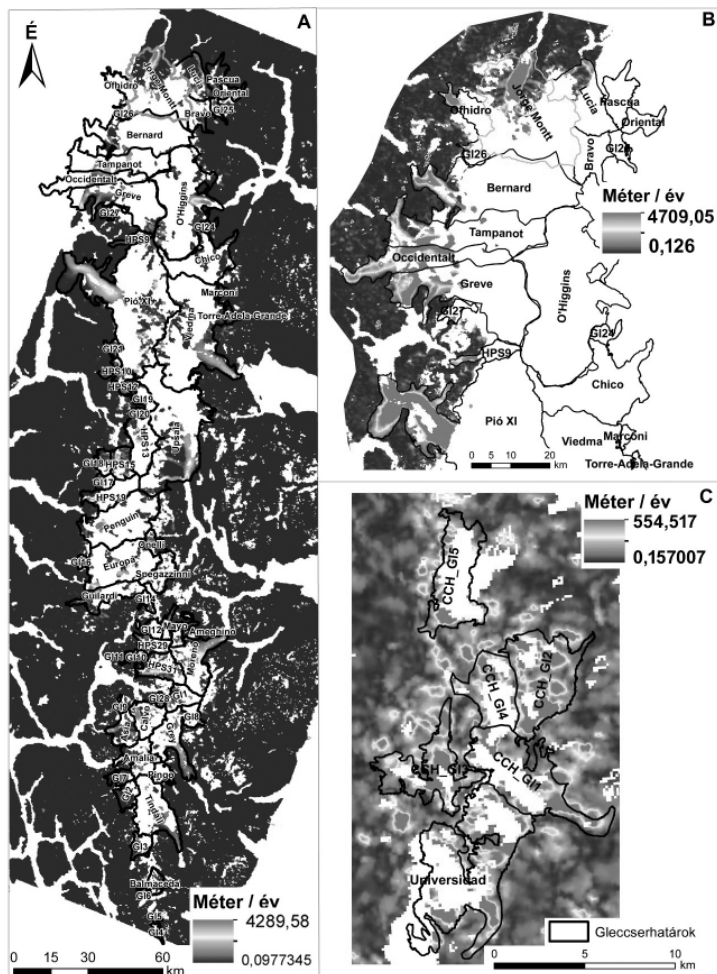
Kutatásom során a Dél-patagóniai-jégmező 2019. februártól – májusig tartó (3. ábra, A kép) és 2019. novemberi (3. ábra, B kép) időszakaira vonatkozóan sikerült eredményes számításokat végezni. Utóbbi időszekekre vonatkozó mérés történt időben korábban, melynek során a jégmezőn belül a fókusz a Jorge Montt-gleccseren volt. Az adatok összehasonlítása előtt fontos megemlíteni, hogy a déli félteke évszakai az északi féltekéhez képest éppen ellenkezőleg alakulnak. A nyár decembertől februárig, az ősz márciustól májusig, a tél júniustól augusztusig és a tavasz szeptembertől novemberig tart. Összesen hét mérés kiértékelését végeztem el a Dél-patagóniai-jégmezővel kapcsolatban. Az őszi időszakban februártól-májusig minden hónapban egy-egy mérés, novemberben, a tavaszi időszakban pedig három mérés történt, a hónap elején, közepén és végén. A mérések során kapott sebességi értékek minden esetben egy 12 napos időszakot reprezentálnak számunkra, mértékegységeket azonban egy teljes évre vetítjük. Ennek legfőbb oka, hogy a Tracking módszerek során kapott sebességi értékek a szakirodalomban is méter/év mértékegységgel vannak kifejezve. Így a kapott eredményeink korábbi eredményekkel való összehasonlításához célszerű azokat méter/év mértékegységre konvertálni. A területen a leggyorsabb felszíni mozgás a tavaszi időszakban a Jorge Montt-gleccseren volt mérhető. November elején 4709,1 méter/év, november közepén 4464,8 méter/év és november végén 3320 méter/év sebességi értékeket produkált a gleccser. A második leggyorsabb mozgású gleccser a tavaszi időszakban a HPS13 lett, mely a november közepi mérés során kapott 3934,8 méter/éves sebességével megközelíti a Jorge Montt-gleccser sebességi értékeit. Az őszi időszakban a Jorge Montt-gleccser sebességi értékei ennél valamelyest alacsonyabban, a november végi sebességi értékekhez hasonlóan alakultak, 3018,2 és 3515,5 méter/éves sebességi értékek között. Az őszi időszakban a HPS29 gleccser felszíni mozgása bizonyult a leggyorsabbnak az egyes hónapokban, februárban 3688 méter/év, márciusban 3840,5 méter/év, áprilisban 3319,5 méter/év és májusban 4289,6 méter/év értékekkel. A HPS29-gleccser kimagasló értékei igen különösek a gleccser méretéhez viszonyítva, mely mindösszesen 49 km², szemben a Jorge Montt-gleccser 531 km²-es kiterjedésével. A jégmező legnagyobb gleccsere a Pió XI, 1246 km²-es területével, mely sebessége szintén kimagasló volt, de jóval alacsonyabb a Jorge Montt- és a HPS29-gleccserekéhez képest. A Pió XI sebessége az őszi és tavaszi időszakokban egyaránt 2000 méter/éves sebességi értékek körül alakult, sebessége tehát a Jorge Montt-gleccseréhez képest sokkal kiegyenlítettebb értékeket mutatott. Tavasszal (novemberben) 2000 méter/év fölötti érték mindösszesen kettő, a Jorge Montt- és

Pió XI-gleccseren volt mérhető. További nyolc gleccser mozgott 1000-2000 méter/év közötti értékekkel: a Greve-, Lucia-, Oriental-, Gl19-, Gl24-, HPS9-, HPS10-, HPS12-gleccserek. Az őszi időszakban (február – május) nyolc gleccser felszíni sebessége haladta meg a 2000 méter/éves értéket: a Calvo-, O'Higgins-, Gl12-, Gl18-, HPS13-, HPS15-, HPS19-, HPS31-gleccserek és további négy gleccser csak a májusi hónapban haladta meg a 2000 méter/éves felszíni sebességet: az Amalia-, Europa-, Penguin- és HPS10-gleccserek. További 27 gleccser felszíni mozgása alakult 1000-2000 méter/éves értékek között összkel: az Amalia-, Ameghino-, Asia-, Bravo-, Grey-, Greve-, Guilardi-, Lucia-, Moreno-, Onelli-, Oriental-, Spegazzinni-, Upsala-, Viedma-, Gl1-, Gl2-, Gl17-, Gl8-, Gl19-, Gl21-, Gl24-, Gl28-, HPS9-, HPS10-, HPS12-, HPS13-, HPS15-gleccsereké. A Jorge Montt-gleccser átlagos sebességi értékei alapján kimagasló volt mindkét időszakban. A tavaszi időszakban 600 méter/év körüli átlagos sebességi értékeket mutatott és mindösszesen egy esetben, november elején előzte azt meg a Pió XI 658,2 méter/éves értékkel. Összkel a Jorge Montt-gleccser valamelyest alacsonyabb, 500-550 méter/év körüli átlagos felszíni sebességet produkált, mellyel a leggyorsabb gleccserek közé sorolhatjuk. Mindösszesen öt gleccser előzte meg tavasszal: a Gl12-, HPS13-, HPS19-, HPS29- és a Calvo-gleccser, melyek közül utóbbi bizonyult a leggyorsabbnak az őszi időszakban, 871 méter/éves átlagos sebességi értékkel.

4.2.2. Az Universidad-gleccser és környékének sebessége

Az Universidad-gleccser és környékére vonatkozó számítások 2019. július és november (3. ábra, C kép) hónapok kapcsán történtek. Így a téli és tavaszi időszakról egyaránt születtek használható eredmények. A területen vizsgált hat gleccser közül az Universidad-gleccser a legnagyobb kiterjedésű, 32 km²-rel. A gleccser felszíni sebessége kimagasló volt, a háromból két időpont bizonyult a terület leggyorsabban mozgó jégárának. Továbbá sebességi értékeinek növekedése volt megfigyelhető a nyár felé, vagyis december felé közeledve. Július elején 312,7 méter/év, július végén 383,8 méter/év és november végén 554,5 méter/év maximális sebesség volt mérhető területén. A Jorge Montt-gleccsernél tapasztalt legnagyobb sebességi értékek esetén azok csökkenése volt megfigyelhető december felé közeledve, így elmondható, hogy a két gleccser sebessége teljesen ellentétes mozgást mutatott. Ennek egyik oka lehet a szubglaciális hidrológiai hálózat, mely a két területen eltérően fejlődik az olvadási időszak beálltával. Az Universidad-gleccser és környékén az átlagos sebességi értékek a Dél-patagóniai-jégmezőnél jóval alacsonyabbak voltak, 47-148 méter/éves értékek között mozogtak. Ez nem is meglepő ezen a szélességen, ahol a gleccserek kiterjedésének csökkenésével sebességük csökkenése is együtt jár. A legmagasabb

átlagos sebességet az Universidad-gleccser mutatta: július elején 112,9 méter/év, július végén 136,4 méter/év és november végén 148 méter/év értékekkel.



3. ábra: Felszíni sebességmérések eredményei a vizsgálati helyszínekről.
 A= Dél-patagóniai-jégmező 2019.05.02. – 2019.05.14. közötti időszakra számított sebesség; B= Dél-patagóniai-jégmező (fókusz a Jorge Montt-gleccseren) 2019.11.03. – 2019.11.15. közötti időszakra számított sebesség; C= Universidad-gleccser és környéke 2019.11.14. – 2019.11.26. közötti időszakra számított sebesség.

5. Diszkusszió és következtetések

5.1. Megfigyelések a sebességtérképek alapján

A Dél-patagóniai-jégmező esetében a módszer nagyon jó lefedettséggel tudott sikeresen sebességet mérni (3. ábra, A és B kép). A gleccserek frontjánál sok esetben nagy területet lefedő, összefüggő eredményeket kaptunk. Azonban a térképeken szembetűnő jelenség az is, hogy a magasabban fekvő területeken az algoritmus nem tudott sebességet mérni. Ez a jelenség a két mérési időszak között eltérő mértékben jelentkezik. A februártól-májusig tartó (ősz) időszakban a magasabban fekvő területekről mozaikosan rendelkezésre állnak sebességi értékek, ezzel szemben a novemberi (tavaszi – nyári) időszakban egyáltalán nem sikerült a módszernek ezen területeken sebességet mérnie. A jelenség mögött a magasabban fekvő területek állandó hóborítottsága állhat, továbbá a tavasz beálltával jelentkező hőmérsékletemelkedés okozta olvadás. Utóbbi a fizikai paraméterek segítségével detektált követhető objektumokat nagy mértékben átalakítja és számos új objektum megjelenését okozza, mely erős dekorrelációt (nem áll rendelkezésre elegendő közös pont az elmozdulás detektálásához) okoz a két felvételen. A két mérési időszak között tapasztalt különbség a statisztikailag értékelhető területek nagyságában is megmutatkozik. Statisztikailag értékelhetőnek azon területeket tekinthetjük, melyeken a mért sebességi értékekből kivonva az algoritmus által az adott pixelre számított hiba mértékét pozitív számot kapunk. Tehát a számított hiba nagysága nem haladja meg a mért sebességi értéket. A 4. ábrán egy márciusi (ősz) és egy novemberi (tavaszi) mérés statisztikailag értékelhető területeinek arányának összehasonlítása látható lebontva az egyes gleccserek területére. Szembetűnő, hogy a márciusban tapasztalt értékelhető területek lefedettsége a gleccserek teljes területéhez viszonyítva majdnem minden esetben nagyobb, mint a novemberi mérésnél. Ez alól csak a Lucia-, Marconi- és az Oriental-gleccserek képeznek kivételt.

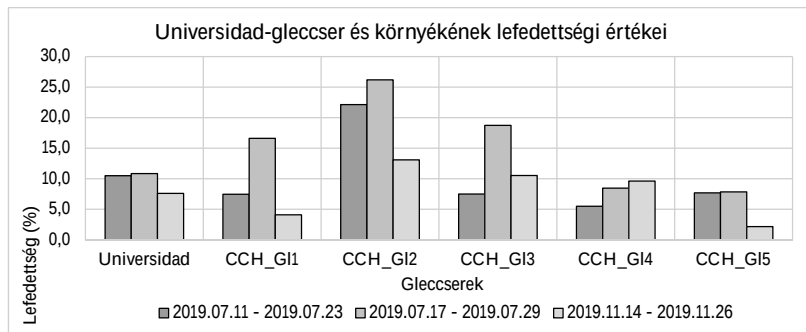


4. ábra: A Dél-patagóniai-jégmező statistikailag értékelhető területeinek összehasonlítása.

A statistikailag értékelhető területek aránya mellett a sebességi értékek eltérően alakultak a két időszakban. A leggyorsabban mozgó területek a mérési időszaktól függetlenül a gleccserek frontjánál találhatók, és csak néhány esetben fordult elő, hogy egyes gleccserek akkumulációs területén is gyorsan mozgó területeket detektált a módszer. Ilyen gleccserek a Piö XI és a HPS13, amelyeken 2000-3000 méter/éves sebesség azok frontjától távol, akkumulációs területükön is mérhető volt. A legnagyobb sebességi értékek a tavaszi időszakban voltak mérhetőek a Jorge Montt-gleccser területén, mely maximális 4709,1 méter/éves sebességet is produkált. Az őszi időszakban ennél valamivel alacsonyabb, de szintén magas értékek is megfigyelhetők voltak, a nagyobb gleccserek területén 2000-4000 méter/év közötti sebesség volt mérhető.

Az Universidad-gleccser és környéke statistikailag értékelhető területeinek aránya jóval alacsonyabban alakult (5. ábra), mint a tőle délebbre fekvő jégmező területén. Ez az eredmény a várakozásoknak megfelel, mivel a módszer érzékenysége a déli, csapadéokban gazdag területektől észak felé haladva a bizonytalanabb területek felé növekszik. Az értékelhető területek eloszlása azonban jobbnak mondható a jégmezőn tapasztaltakhoz képest, mivel ezek a területek itt nem csak a gleccserek frontjára korlátozódnak, hanem egyenletesebb eloszlást mutatnak. Ennek egyik oka lehet, hogy ezen a szélességen a módszernek már nem kell az állandó hóborítottással megküzdenie, mivel az csak időszakos, így nem takarja a követhető objektumokat. A statistikailag értékelhető területek arányának csökkenése mellett a gleccserek sebességének csökkenése is

megfigyelhető volt. Az Universidad-gleccser és környékén az éghajlat hegyvidéki mediterrán, mely a kevesebb csapadék és magasabb hőmérséklet formájában is megmutatkozik.³⁷ Ebből következik, hogy az itt található gleccserek kiterjedése és vastagsága csak töredéke, mint délebbi testvéreiké. Ezen tulajdonságok azonban fontos szerepet játszanak sebességük alakulásában.

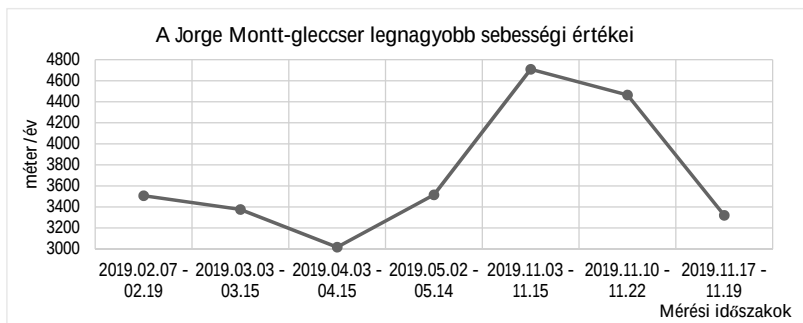


5. ábra: Az Universidad-gleccser és környéke statisztikailag értékelhető területeinek összehasonlítása.

Az Universidad-gleccser és környékének sebességtérképein egy további érdekes jelenség is megfigyelhető volt. Kisebb, kerekded foltokban megjelenő, rendkívül gyors mozgású területeket detektált a módszer a vizsgálati helyszínen mozaikosan szétszórva (3. ábra, C kép). Ezek feltételezhetően hibás értékek, amit a kárfülkékben összegyűlt hó olvadása és visszahúzódása idézett elő. Ezeknek a hibás sebességi értékeknek a kiszűrésében a sebesség eredő vektorának meghatározása segíthetne, mely megmutatná a mért mozgás irányultságát. Amennyiben a hó visszahúzódását mérte hibásan felszíni sebességnek a módszer, úgy a mozgás iránya lejtővel ellentétesen alakulna. Azon sebességi értékek, melyeket a módszer a gleccserek mozgásának detektálásával mért, a lejtőkkel megegyező irányultságot kell, hogy mutassanak.

³⁷ BRAVO et al. (2017)

5.2. Eredmények a korábbi megállapításokhoz viszonyítva



6. ábra: A Jorge Montt-gleccser sebességi értékeiben tapasztalt ciklikusság.

Mindkét terület jégárainak felszíni mozgását korábban már vizsgálták a kutatók, így lehetőségem nyílt a korábbi eredményekkel összevetni az új, 2019-es évben tapasztalt sebességeket. Mivel azonban a korábbi mérések teljesen más módszertanon alapultak, így fontos megemlíteni, hogy az összehasonlítás sok hibával terhelt, de mégis érdekes eredményekkel szolgált. MOUGINOT és RIGNOT³⁸ a patagóniai jégmezők gleccsereinek sebességét 1984 és 2014 közötti időszakban vizsgálták Speckle Tracking módszer alkalmazásával. Az általuk tapasztalt jelenségek közül kiemelném a Jorge Montt-gleccsernél felfedezett sebesség szezonálisitását. Megfigyeléseik alapján kimutatható volt a gleccser erőteljes éves ciklikussága, mely minden év november közepén érte el maximumát. Ez a jelenség az eddig meglévő 2019-es méréseknél is tapasztalható, ha a Jorge Montt-gleccser maximális sebességi értékeit időben egymást követően ábrázoljuk (6. ábra). A jégmező teljes éves vizsgálatával a jövőben a hiányzó hónapok értékei feltételezhetően beleilleneének az eddigi hónapok során tapasztalt folyamatba.

MOUGINOT és RIGNOT fontos megállapítása volt az is, hogy a jégmező gleccsereinek felszíni sebessége évről évre növekedést mutatott. A nagyobb kiterjedésű gleccsereken mért 2014-es sebességekhez képest még nagyobb maximális sebességi értékek figyelhetők meg a 2019-es mérés során a Jorge Montt-, Pió XI-, O'Higgins és Upsala-gleccsereken. A sebesség folyamatos növekedése mögött több ok is állhat, melyeket első sorban a klímaváltozás válthat ki. A hőmérséklet növekedésével a gleccser felszínén keletkező olvadékvíz mennyisége is növekszik, mely a gleccsermalmokon keresztül leszivárog a gleccser aljához.

³⁸ MOUGINOT és RIGNOT (2015)

A leszivárgó olvadékvíz a gleccser alján szubglaciális hidrológiai hálózatot képez, melynek tulajdonságai nagyban befolyásolják egy gleccser sebességét. Azonban a pontos okok és folyamatok felderítéséhez a terület teljes éves vizsgálata és a gleccserek jégvastagsági adatainak figyelembe vétele elengedhetetlen a jövőben.

WILSON és munkatársai³⁹ 1967 és 2015 között az Universidad-gleccser ablációs területének felszíni sebességét vizsgálták Feature Tracking módszer alkalmazásával. A gleccser frontjától kiindulva annak sodorvonala mentén felfelé haladva vizsgálták a felszíni sebességet, melynek folytonos növekedése volt megfigyelhető a magasabban fekvő területek irányába. Megfigyeléseik alapján tudjuk, hogy a gleccser ablációs területének sebessége 1986 és 1987 között volt a leggyorsabb, a gleccser frontjánál 40 méter/év, a magasabban fekvő területeken 256 méter/év maximális sebességet elérve. Ezt követően drasztikus csökkenés volt kimutatható, 2015-ben a gleccser frontjánál már csak mindösszesen 5 méter/év és a magasabban fekvő területeken 79 méter/év maximális sebességi értékkel. A 2019-es új mérések a 2015-ös méréshez képest a sebesség felgyorsulását mutatják, a gleccser frontjánál 40 méter/év, a magasabban fekvő területeken 150 méter/év felszíni sebességi értékeket is elérve.

5.3. A módszer alkalmazhatósága

A Tracking módszerek alkalmazásánál az egyik legalapvetőbb probléma, ha nem áll rendelkezésre elegendő követhető objektum, melyek alapján sebességet tudna mérni az algoritmus. A Dél-patagóniai-jégmezőn ez a probléma a látható objektumok hiányában és a fizikai paraméterek gyors megváltozásában is megmutatkozott. A magasabban fekvő, állandóan hóval fedett területek esetében a látható objektumok hiánya jelentkezett. Ha összevetjük a sebesség és magassági értékek térképet, akkor elmondható, hogy ez a probléma az 1300 méternél magasabban fekvő területekre volt jellemző. Az alacsonyabban fekvő területeken az objektumok láthatósága kevésbé okozott gondot, de a tavaszi-nyári oladási időszakban a fizikai paraméterek gyors megváltozásával kellett számoljunk. MOUGINOT és RIGNOT⁴⁰ a Speckle Tracking módszer alkalmazásával a magasabban fekvő területek esetében megfigyelték a jelek alacsony koherenciáját. Így nem meglepő, hogy ezen területeken csak igen kevés esetben sikerült felszíni sebességet mérni, azt is inkább az őszi időszakban. Mindezen hátrányokat a gleccserek nagy kiterjedése és rendkívül gyors

³⁹ WILSON et al. (2016)

⁴⁰ MOUGINOT és RIGNOT (2015)

mozgása valamelyest ellensúlyozta, mely azonban a minél északabbra eső területeken már nem mondható el. Az Universidad-gleccser és környékén a gleccserek kiterjedése jóval elmarad a déli, óceáni éghajlatú területekhez képest. Az Universidad-gleccser így is kimagaslónak számít saját szélességén, a maga 32 km²-es kiterjedésével, mely azonban a Jorge Montt-gleccser 509 km²-es vagy a Pió XI-gleccser 1246 km²-es kiterjedéséhez képest mégis nagyon kevésnek tűnik. Egy gleccser felületének csökkenésével pedig a követhető objektumok száma és mérete is csökken, mely a Tracking módszerek elé újabb kihívást állított. Továbbá a felület csökkenésével a gleccserek vastagságának csökkenését is feltételezhetjük, ami pedig a gleccserek mozgásának csökkenésében fog megmutatkozni. Az Universidad-gleccser és környékén a domborzati adottságok is tovább nehezítették a sikeres mérés elvégzését, mely megmutatkozott a kárfülkékben hibásan sebességként mért hóvisszahúzódas jelenségében is. A két mintaterületen jelentkező problémákra, a követhető objektumok számának növelésére egy jó megoldás lehetne, ha időben egymáshoz közelebb eső képpárokat vizsgálnánk, de ez a műholdpályák nem azonos átfedése miatt nehéz feladat. A Sentinel 1 műholdak 12 naponta térnek vissza ugyanazon terület fölé egymáshoz képest 6 napos eltolásban. Szerencsés esetben tehát találhatunk 6 napos átfedéssel készült képpárokat is. Erre a sarkok közelében van a legnagyobb esélyünk, onnan távolodva pedig egyre kisebb szerencsével találhatunk időben egymáshoz közelebb eső képpárokat, de mégis érdemes időt szánni ezek felkutatására.⁴¹

6. Összegzés

A gleccserek Földünkön kimagasló klímajelző szerepet töltenek be, melynek oka, hogy éghajlatunk átalakulására szinte azonnal reagálnak.⁴² A klímakutatásban betöltött fontos szerepük mellett Földünk bizonyos térségeiben társadalmi fontossággal is bírnak, ahol az édesvízkészletek jelentős részét szolgáltatják olvadásukkal.^{43, 44} A jégárak kiterjedésének változása mellett mozgásuk is alkalmas a környezeti átalakulás mértékének megbecslésére. Felszíni sebességük vizsgálata és a vizsgálatra alkalmas módszerek elemzése tehát rendkívül fontos feladat. Kutatásom során dél-amerikai jégárak mozgását vizsgáltam egy olyan módszer segítségével, mely a Feature és Speckle Tracking-et egyidőben képes

⁴¹ MOUGINOT et al. (2012)

⁴² VINCENT et al. (2009)

⁴³ BRAVO et al. (2017)

⁴⁴ IPCC (2019)

alkalmazni és mellyel korábban csak poláris területeket vizsgáltak. A kutatásom vizsgálati helyszínét a Dél-patagóniai-jégmező és az Universidad-gleccser és környéke képezte. A Dél-patagóniai-jégmező Földünk egyik legjobban eljegesedett térsége, ahol a rengeteg csapadéknak köszönhetően a gleccserek kiterjedése igen jelentős. A mérések alapján a jégmező gleccsereinek gyors mozgása volt kimutatható, mely a tavaszi és őszi vizsgálati időszakban, rövid időszakra vonatkozóan a 3000 méter/éves sebességi értékeket is meghaladta számos gleccser esetében. MOUGINOT és RIGNOT⁴⁵ korábbi mérései alapján bizonyos gleccserek felszíni sebességének megnövekedése volt megfigyelhető, és az általuk felfedezett éves ciklikus sebességváltozást a Jorge Montt-gleccser területén az új mérések is valószínűsítették. A terület magasabban fekvő részein azonban az állandó hóborítás megakadályozta a felszíni sebesség mérését, a követhető objektumok eltakarása miatt. Az Universidad-gleccser és környékén a jégárak kiterjedése az alacsonyabb csapadék és magasabb hőmérséklet következtében jóval elmarad a Dél-patagóniai-jégmezőhöz képest. Ennek ellenére a gleccserek felszíni mozgása mérhető volt a módszer segítségével, de a statisztikailag értékelhető területek aránya alacsonyabban alakult. A legnagyobb mért felszíni mozgás nem haladta meg az 555 méter/éves sebességet. A gleccserek átlagos sebességi értékei 100 méter/év körüli értékeket mutattak, és – nem meglepően – lassabbnak bizonyultak a jégmező gleccsereihez képest. WILSON és munkatársainak⁴⁶ korábbi, 2015-ös sebességi értékeihez képest a terület jégárainak felszíni sebessége megnövekedett. A térség legnagyobb gleccsere, az Universidad-gleccser sebességi értékeinek összehasonlítása a Jorge Montt-gleccserével érdekes eredményt mutatott. Míg előbbi sebessége a nyár felé közeledve növekedést, utóbbié csökkenést mutatott, melyet a szubglaciális hidrológiai hálózat eltérő fejlődése is okozhat. A módszer alkalmazása ígéretesnek bizonyult és a jövőben a vizsgálati időszak és vizsgálati helyszínek kiterjesztésével további információkkal szolgálhat Földünk klímaváltozás következtében fellépő átalakulásáról.

⁴⁵ MOUGINOT és RIGNOT (2015)

⁴⁶ WILSON et al. (2016)

Bibliográfia

- ANIYA, M., DHAKAL, A.S., PARK, S. és NARUSE, R. (2000), Variations of Patagonian Glaciers, South America, Using RADARSAT and Landsat Images. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 26(6):501-511.
- ANIYA, M., NARUSE, R., SHIZUKUISHI, M., SKVARCA, P. és CASASSA, G. (1992), Monitoring recent glacier variations in the Southern Patagonia Icefield, utilizing remote sensing data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 29(B7):87-94.
- BAMBER, J.L., VAUGHAN, D.G. és JOUGHIN, I. (2000), Widespread Complex Flow in the Interior of the Antarctic Ice Sheet. *Science*. 287:1248-1250.
- BRAVO, C., LORIAUX, T., RIVERA, A. és BROCK, B.W. (2017), Assessing glacier melt contribution to streamflow at Universidad Glacier, central Andes of Chile. *Hidrology and Earth System Sciences*. 21:3249-3266.
- CSATHÓ, B.M., BOLZAN, J.F., VAN DER VEEN, C.J., SCHENK, A.F. és LEE, D.C. (1999), Surface velocities of a Greenland outlet glacier from high-resolution visible satellite imagery. *Polar Geography*. 23(1):71-82.
- FREZZOTTI, M., CAPRA, A. és VITTUARI, L. (1998), Comparison between glacier ice velocities inferred from GPS and sequential satellite images. *Annals of Glaciology*. 27:54-60.
- IPCC (2019), PÖRTNER, H.O., ROBERTS, D.C., MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P., TIGNOR, M., POLOCZANSKA, E., MINTENBECK, K., NICOLAI, M., OKEM, A., PETZOLD, J., RAMA, B., WEYER, N. :Summary for Policymakers. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*
- JANKE, J. R. (2013), Using airborne LiDAR and USGS DEM data for assessing rock glaciers and glaciers, *Geomorphology*. 195(2013):118-130.
- JOUGHIN, I., ABDALATI, W. és FAHNESTOCK, M. (2004), Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbræ glacier. *Nature*. 432:608-610.
- LE QUESNE, C., ACUNA, C., BONINSEGNA, J.A., RIVERA, A. és BARICHIVICH, J. (2009), Long-term glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 281:334-344.
- LIU, H., ZHAO, Z. és JEZEK, K.C. (2007), Synergistic Fusion of Interferometric and Speckle-Tracking Methods for Deriving Surface Velocity From Interferometric SAR Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 4(1):102-106.
- LUCKMAN, A., MURRAY, T., JISKOOT, H., PRITCHARD, H. és STROZZI, T. (2003), ERS SAR feature-tracking measurement of outlet glaciers velocities on a regional scale in East Greenland. *Annals of Glaciology*. 36:129-134.

- MERCER, J. H. (1964), Advance of a Patagonian glacier. *Journal of Glaciology*. 5(38):267-268.
- MERCER, J. H. (1965), Glacier variations in southern Patagonia. *The Geographical Review*. 55:390-413.
- MERCER, J. H. (1968), Variations of some Patagonian glaciers since the late-glacial. *American Journal of Science*. 266:91-109.
- MOHR, J.J., REEH, N. és MADSEN, S.N. (1998), Three-dimensional glacial flow and surface elevation measured with radar interferometry. *Nature*. 391:273-276.
- MOUGINOT, J. és RIGNOT, E. (2015), Ice motion of the Patagonian Icefields of South America: 1984-2014. *Geophysical Research Letters*. 42:1441-1449.
- MOUGINOT, J., SCHEUCHL, B. és RIGNOT, E. (2012), Mapping of Ice Motion in Antarctica Using Synthetic-Aperture Radar Data. *Remote Sensing*. 4:2753-2767.
- NICHOLS, R.L. és MILLER, M.M. (1952), The Moreno Glacier, Lago Argentino, Patagonia: advancing glaciers and nearby simultaneously retreating glaciers. *Journal of Glaciology*. 2(11):41-46.
- RACOVITEANU, A.E., PAUL, F., RAUB, B., KHALSA, S.J.S. és ARMSTRONG, R. (2009), Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA. *Annals of Glaciology*. 50(53):53-69.
- RAUB, B.H., RACOVITEANU, A., KHALSA S.J.S., HELM, C., ARMSTRONG, R. és ARNAUD, Y. (2007), The GLIMS Geospatial Glacier Database: a New Tool for Studying Glacier Change. *Global and Planetary Change*. 56:101-110.
- RIVERA, A., KOPPES, M., BRAVO, C., és ARAVENA, J.C. (2012), Little Ice Age advance and retreat of Glacier Jorge Montt, Chilean Patagonia. *Climate of the Past*. 8:403-414.
- RODRÍGUEZ, E., MORRIS, C.S. és BELZ, J.E. (2006), A Global Assessment of the SRTM Performance. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 72(3):249-260.
- ROLSTAD, C., AMLIEN, J., HAGEN, J.-O. és LUNDÉN, B. (1997), Visible and near-infrared digital images for determination of ice velocities and surface elevation during a surge on Oslobreen, a tidewater glacier in Svalbard. *Annals of Glaciology*. 24:255-261.
- SHORT, N.H. és GRAY, A.L. (2004), Potential for RADARSAT-2 interferometry: glacier monitoring using speckle tracking. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 30(3):504-509.
- TUCKETT, P.A., ELY, J.C., SOLE, A.J., LIVINGSTONE, S.J., DAVISON, B.J., WESSEM, J.M. és HOWARD, J. (2019), Rapid accelerations of Antarctic Peninsula outlet glaciers driven by surface melt. *Nature Communications*. 10(4311):1-8.

- VINCENT, C., SORUCO, A., SIX, D. és LE MEUR, E. (2009), Glacier thickening and decay analysis from 50 years of glaciological observations performed on Glacier d'Argentière, Mont Blanc area, France. *Annals of Glaciology*. 50(50):73-79.
- WILSON, R., MERNILD, S.H., MALMROS, J.K., BRAVO, C. és CARRIÓN, D. (2016), Surface velocity fluctuations for Glaciar Universidad, central Chile, between 1967 and 2015. *Journal of Glaciology*. 62(235):847-860.