



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Metodologías de percepción remota para evaluar el retroceso y las variaciones de superficie y volumen de glaciares de los Andes patagónicos, y sus aportes de agua a lagos terminales. Caso de estudio: Glaciares Upsala y Perito Moreno

Por: Javier Andrade Jiménez

Tesis presentada a la Facultad de ciencias físicas y matemáticas Universidad
de Concepción para optar al grado académico de geofísico

Profesor Guía:
Rodrigo Abarca del Río

Comisión evaluadora:
Dr. Guido Staub - MSc. Marcel Fuentes - Dr. Jean François-Cretaux

Agosto 2023
Concepción, Chile

© 2023, Javier Andrade

Ninguna parte de esta tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o por ningún medio o procedimiento, sin permiso por escrito del autor.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

AGRADECIMIENTOS

Primero agradecer a mi familia en especial a mi madre, padre y hermana. En donde yo creo sobran las palabras para expresar el cariño y gratitud que les tengo por apoyarme durante todo este tiempo. Además darle las gracias a mi familia no sanguínea Juan Pablo, Sebastián y Cristóbal por acompañarme con su cariño, conversaciones, juegos (magic) y karaoke hasta el amanecer durante tanto tiempo. También a la gente que conocí y que formo parte de mi vida y círculo más cercano durante mi estancia en la universidad, José Tomas, Martín, María y Valentina. Por esos almuerzos, cafés y copuchas que tuvimos y espero tendremos a futuro. A Javiera por el cariño y apoyo tanto en los buenos como malos momentos. A todos por su enorme cariño entregado desde que los conozco. A los Puig-Contreras por hacerme sentir como parte de su familia durante casi toda mi vida.

Agradecer al cuerpo docente y a funcionarios del departamento de geofísica de la Universidad de Concepción. Especialmente al Dr. Rodrigo Abarca del Río por recibirme como alumno, compartir sus conocimientos y guiarme, además de entregarme su confianza y apoyo tanto dentro como afuera del ámbito profesional, a lo largo de mi estancia en la carrera. Además de los planes a futuro que se aproximan terminado ya este proceso. A los miembros de la comisión Dr. Guido Staub, MSc. Marcel Fuente y Dr. Jean François-Cretaux, por brindarme su tiempo y dedicación durante este estudio.

Finalmente un agradecimiento especial a la Sra. Sandra y a don Hernán por esos almuerzos y borgoñas que vinieron y vendrán durante mucho tiempo más. Y a Lalo, Felipe, Pablo y Toño por tanto que me acompañaron durante todas las noches horas de estudio

Resumen

Los glaciares son especialmente sensibles a los procesos climáticos que ocurren en la zona en el cual estos están presentes. Por esto es de vital importancia conocer tanto las variaciones que pueda ir presentándose en estos cuerpos, como de las cuencas en las cuales estos están presentes. Notablemente sus variaciones son de suma importancia en términos de masa de agua cuando estos alimentan los lagos atinentes.

Este trabajo comprende la zona de estudio relacionada con “El Parque Nacional Los Glaciares” (entre 48°S a 52°S), un área protegida federal en la provincia de Santa Cruz, (Argentina) que tiene una superficie de 7.230 km² lo que lo convierte en el parque nacional más grande del país. Esta zona presenta dos grandes lagos los cuales son el Lago Argentino y Lago Viedma, que son de los más grandes de América del sur. El Lago Argentino está conectado con distintos glaciares, por ejemplo, Perito Moreno, Spegazzini, Onelli, Agassiz, de Mayo, Bolado, Upsala por medio de distintos canales tales como brazo Upsala, brazo Norte y canal de los Témpanos. En tanto el Lago Viedma es alimentado básicamente por el glaciar Viedma ubicado en el extremo oeste, tal ventisquero mide 5 km de ancho.

Este trabajo se centra en desarrollar una metodología capaz de delimitar distintos glaciares, utilizando técnicas de percepción remota, centrándose en imágenes satelitales Landsat-8 y ASTER entre los años 1997 a 2021. Se evalúan diferentes técnicas tales como índices espectrales de nieve, hielo y/o glaciares que permiten delimitar sus diferentes zonas y extensión, los índices utilizados son NDSI, SGI, S3 Index, NDSII y NDWI. Además de falso color, cálculo de volumen mediante modelos digitales de elevación. Con el fin de obtener la variación de superficie, cambios de volumen, masa y equivalente en nivel del lago. Esta metodología aplicada al glaciar Upsala y glaciar Perito Moreno.

La superficie del glaciar Upsala entre 1997 a 2021 tuvo una reducción de aproximadamente 72 km² significando un 9 % de pérdida a lo largo de 25 años. En contraste con el glaciar Upsala, el glaciar Perito Moreno no ha tenido grandes cambios durante este tiempo. Sin embargo posterior al año 2018 este ha sufrido una pérdida de superficie sostenida en el tiempo. Algo totalmente anómalo en

este glaciar el cual está caracterizado por tener cambios que van entre ganancia y pérdida constante sin una tendencia clara.

Para el caso de cambios de volumen en el glaciar Upsala en este no solo existe un retroceso del glaciar, sino también una disminución en la altura promedio en distintas zonas. Con pérdidas de volumen de entre 1.5 a 3 km³. Significando valores de entre 0.8 a 1.8 metros de aporte neto al nivel del lago. Además al evaluar el volumen, existen años particulares en los que, a diferencia de la norma, el glaciar ganó altura (y volumen) a pesar de la pérdida de superficie total durante esos años (2016-2017).

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
Resumen	II
1. Introducción	1
1.1. Histórico	1
1.1.1. Campos de Hielo Sur	1
1.1.2. Glaciar Upsala	4
1.1.3. Glaciar Perito Moreno	5
1.2. Glaciares	6
1.2.1. Zonas de un glaciar	7
1.3. Objetivos	9
1.3.1. Objetivos generales	9
1.3.2. Objetivos específicos	9
1.3.3. Hipótesis	10
2. Marco Teórico	11
2.1. Percepción remota	11
2.1.1. Landsat	11
2.1.2. ASTER	14
2.2. Combinación de bandas	14
2.3. Modelos de digitales de elevación (DEM)	15
2.4. Procesos climáticos	15
2.4.1. Variabilidad climática en Sudamérica y la Patagonia	15
2.4.2. El Nino Oscilación del Sur (ENSO)	17
3. Metodología	20
3.1. Zona de estudio	20
3.2. Datos	20
3.2.1. Datos ERA5	23
3.2.2. Datos In-situ	23
3.2.3. GLIMS	24
3.3. Pre-procesamiento	25
3.3.1. Landsat	25
3.3.2. ASTER	28

3.4. Índices espectrales	29
3.5. Delimitación de glaciares	33
3.5.1. Detección de debris	38
3.5.2. Falso color	41
3.5.3. Cálculo de volumen	43
3.5.3.1. Detección de nubes	43
3.5.4. Variación de volumen a variación de masa	45
3.6. Datos climáticos	46
3.6.1. Validación datos ERA5	46
3.6.2. Coeficiente de correlación de Pearson (r) y error cuadrático medio (RMSE)	48
3.7. Diagrama Metodología	50
4. Resultados	51
4.1. Delimitación glaciares	51
4.1.1. Glaciar Upsala	52
4.1.2. Glaciar Perito Moreno	57
4.2. Cálculo de área glaciar	58
4.2.1. Glaciar Upsala	59
4.2.2. Glaciar Perito Moreno	61
4.3. Variación de volumen y masa	62
4.3.1. Glaciar Upsala	62
4.3.2. Glaciar Perito Moreno	64
4.4. Variación del nivel del lago Argentino y Brazo rico	64
4.4.1. Glaciar Upsala	65
4.4.2. Glaciar Perito Moreno	66
4.5. Comparación datos climáticos	67
4.5.1. Temperatura	68
4.5.1.1. Glaciar Upsala	68
4.5.1.2. Glaciar Perito Moreno	69
4.5.2. Precipitación	70
4.5.2.1. Glaciar Upsala	70
4.5.2.2. Glaciar Perito Moreno	71
4.5.3. Correlación glaciares con datos climáticos	72
5. Discusión	85
5.1. Metodología de delimitación	85
5.2. Variación de superficie de glaciares	86
5.3. Variación volumen del glaciar Upsala	87
5.4. Correlaciones	88
6. Conclusión	92
Referencias	95

Índice de cuadros

2.1.1. Bandas del espectro electromagnético cubierto por Landsat 5, con sus respectivas longitudes de onda. Valores extraídos de U.S. Geological Survey, 2016.	12
2.1.2. Bandas del espectro electromagnético cubierto por Landsat 8, con sus respectivas longitudes de onda y resoluciones para cada banda. Valores extraídos de U.S. Geological Survey, 2016.	13
2.1.3. Bandas de Landsat 9	13
2.1.4. Bandas del espectro electromagnético cubierto por ASTER, con sus respectivas longitudes de onda.	14
3.2.1. Base de datos utilizada para delimitación de glaciares correspondiente a Landsat 5 TM, Landsat 7 TM+ y Landsat 8 ETM. Aquellas bases de datos con asteriscos (*) tuvieron consideraciones especiales para poder obtener la variación de superficie del glaciar	21
3.2.2. Base de datos utilizada para cálculos de volumen mediante modelos de elevación digital ASTER. Estos están separados para glaciares Upsala y Perito Moreno, debido al área de cobertura que posee.	22
3.2.3. Variables utilizadas para el estudio con su respectiva resolución y periodo extraído	23
3.2.4. Variables utilizadas para el estudio con su respectiva resolución y periodo extraído.	23
3.2.5. Datos obtenidos de GLIMS para los glaciares Perito Moreno y Upsala con su respectiva fecha de análisis y la organización que realizó el estudio de delimitación.	25
4.5.1. Correlaciones para la superficie total del glaciar Upsala con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Ambas series con pendiente. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.	73

4.5.2. Correlaciones para la superficie total del glaciar Upsala con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Para este caso las correlaciones fueron realizadas a series en donde les fue extraída la tendencia. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.	74
4.5.3. Correlaciones para la superficie total del glaciar Perito Moreno con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Ambas series con tendencia. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.	76
4.5.4. Correlaciones para la superficie total del glaciar Perito Moreno con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Para este caso las correlaciones fueron realizadas a series en donde les fue extraída la tendencia. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.	77
4.5.5. Correlaciones para la variación de superficie del glaciar Upsala con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Ambas series con tendencia. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.	79
4.5.6. Correlaciones para la variación de superficie del glaciar Upsala con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Para este caso las correlaciones fueron realizadas a series en donde les fue extraída la tendencia. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.	80
4.5.7. Correlaciones para la variación de superficie del glaciar Perito Moreno con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Ambas series con tendencia. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.	82
4.5.8. Correlaciones para la variación de superficie del glaciar Perito Moreno con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Para este caso las correlaciones fueron realizadas a series en donde les fue extraída la tendencia. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.	83

Índice de figuras

1.1.1. Campos de hielo sur considerado toda el área cubierta por hielo dentro de la sección roja, delimitación política Chile-Argentina en amarillo	2
1.1.2. Mapa obtenido del reportaje “A 10 años de una dolorosa pérdida total” publicado por El Mercurio.	3
1.1.3. Zona en negro como la zona aun pendiente por delimitar según tratado de 1998. Imagen referencial obtenida de reportaje: “Chile y Argentina: Un conflicto histórico en Campos de Hielo Sur” por Nicolás Vivar para Fundación Glaciares Chilenos, Octubre 2020. .	4
1.1.4. Distintos glaciares presentes en el complejo del glaciar Upsala, de sur a norte glaciares Bertacchi, Cono y Murallón, todos estos conectados a la zona de ablación del mismo glaciar Upsala. Imagen obtenida de (Moragues et al., 2017)	5
1.2.1. Zonas del glaciar subdividas por lo planteado en (Müller, 1962), haciendo diferencia entre Zona de nieve seca, de percolación, nieve húmeda, de hielo superpuesto y zona de ablación, con sus respectivas líneas de separación. Imagen obtenida en (Alley, 2011)	9
2.4.1. Ejemplos de las distintas fases de ENOS con: a) fase extrema positiva del ENOS, con altas anomalías negativas de temperatura. b) Fase negativa extrema donde hay grandes anomalías negativas de temperatura. c) Fase positiva moderada y d) Fase negativa moderada. Imagen extraída de (Cai et al., 2015)	18
2.4.2. Zona del Niño 3 en rojo y el Niño 4 en azul, remarcada en rectángulo negro zona perteneciente a “El Niño 3.4” (a) Imagen obtenida de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Variación de la anomalía de TSM para la sección de El Niño 3.4 dando así como resultado “El Niño3.4 Index” (b), se muestra en colores rojos meses con anomalías positivas con valores sobre 0.5 años considerados como El Niño y valores inferiores a -0.5 como La Niña	19

3.4.1.Ejemplo índice NDSI para GPM 2019 (a) y para glaciar Upsala (b) esto para enero del año 2019 el cual como se explica en secciones anteriores es tomado como el año 2018. Los tonos más azulados/verdes corresponderán a zonas en donde el índice detecte presencia de nieve o hielo. Mientras que zonas con colores más amarillos o naranjos zonas sin nieve.	30
3.4.2.Ejemplo índice NDSII para GPM 2019 (a) y para glaciar Upsala (b) esto para Enero del año 2019 el cual como se explica en secciones anteriores es tomado como el año 2018. Los tonos más azulados/verdes corresponderán a zonas en donde el índice detecte presencia de nieve o hielo. Haciendo la diferencia entre nieve y hielo, dependiendo de los valores que tome el índice.	31
3.4.3.Ejemplo índice NDWI para toda la zona de estudio, poniendo especial énfasis en las zonas de lago Argentino esto para Enero del año 2019 el cual como se explica en secciones anteriores es tomado como el año 2018. Los tonos más azulados/verdes corresponderán a zonas en donde el índice detecte presencia de agua o mayor humedad.	32
3.4.4.Ejemplo índice S3 para GPM 2019 (a) y para glaciar Upsala (b) esto para enero del año 2019 el cual como se explica en secciones anteriores es tomado como el año 2018. Los tonos más azulados/verdes corresponderán a zonas en donde el índice detecte presencia de nieve o hielo. Mientras que zonas con colores más amarillos o naranjos zonas sin nieve.	33
3.5.1.Ejemplo delimitación parte trasera glaciar Upsala para año 2019	34
3.5.2.Ejemplo Máscara NDSI para el año 2019, en celeste, zonas con presencia de nieve/hielo según índice espectral(a). Demarcado en rojo al norte glaciar Upsala, al sur glaciar Perito Moreno (b).	35
3.5.3.Ejemplo Mascara NDWI para glaciar Upsala 2019, en celeste zonas con presencia de agua según índice espectral, (b) demarcado en rojo al norte glaciar Upsala, al sur glaciar Perito Moreno.	36
3.5.4.Mascara de zonas con nieve y hielo al realizar la substracción entre índice NDSI y NDWI	37
3.5.5.Máscara de zonas con nieve hielo en color celeste, realizada con la substracción de los índices NDSI y NDWI zoom de la zona de glaciar Perito Moreno (a) y glaciar Upsala (b)	38
3.5.6.Mapas de temperatura para zona de estudio, obtenidos mediante bandas termales de datos Landsat 8, mapa con escala continua (a) y discretizados (b) ambos con sus respectivas escalas de colores en la esquina inferior izquierda	39
3.5.7.Mapas de temperatura discreta (derecha) y combinación de bandas en color real (izquierda).	41
3.5.8.Falso color con combinación de azul, SWIR1 y SWIR2 en orden RGB para glaciar Perito Moreno (a) y glaciar Upsala (b).	42
3.5.9.Falso color con combinación de NIR, Rojo y Verde en orden RGB para glaciar Perito Moreno (a) y glaciar Upsala (b).	42

3.5.10	Muestra la extracción final de nubes para la zona del glaciar Upsala en 2005, que se utilizará para el cálculo de volumen. A la izquierda, se muestra un acercamiento a la zona de ablación del glaciar, específicamente el área en el rectángulo rosa. El rectángulo con bordes rojos indica la zona donde se extrajeron las nubes y se reemplazaron por valores sin datos (NaN).	44
3.5.11	DEM del glaciar Upsala para el año 2005, con las llamadas zonas representativas seleccionadas en polígonos de color burdeo, estos son seleccionados dentro de la zona de ablación de cada uno de los glaciares, es decir glaciar Upsala, Bertacchi, Murallón y Cono. . . .	45
3.6.1	Scatterplot de temperatura observada por la estación meteorológica en el eje x y temperatura obtenida en el mismo punto con ERA5 (a), con su respectiva recta ajustada en rojo. Comparación entre la serie generada a lo largo del tiempo en para la estación(rojo) y con los datos de ERA5 (azul). Se presenta en líneas solidas la media de cada serie con su color respectivo y en líneas discontinuas las desviaciones estándar de las series.	47
3.6.2	Scatterplot de temperatura observada por la estación meteorológica en el eje x y temperatura obtenida en el mismo punto con ERA5 ya aplicada ambas constantes de corrección(a), con su respectiva recta ajustada en rojo. Comparación entre la serie generada a lo largo del tiempo en para la estación(rojo) y con los datos de ERA5 corregidos (azul). Se presenta en líneas solidas la media de cada serie con su color respectivo y en líneas discontinuas las desviaciones estándar de las series.	48
3.7.1	Diagrama de flujo de la metodología utilizada para el estudio presentado anteriormente, empezando con cada una de las bases de datos utilizadas, en un principio Landsat 5,7 y 8, ASTER_DEM y SRTM_DEM.	50
4.1.1	Delimitación final para glaciar Perito Moreno (a) y glaciar Upsala (b), para noviembre del año 2019	52
4.1.2	Delimitaciones de cada año del glaciar Upsala. Con el blanco indicando el año inicial del estudio (1997) pasando de tonos fríos (azul, celeste, verde). A tonos cálidos (amarillos, rojizos) para años más actuales, hasta el negro representando los años más recientes (2021).	53
4.1.3	Frente del glaciar Upsala a lo largo del tiempo, para la zona terminante en brazo Upsala (a), retroceso de este con énfasis en zona terminante en lago Guillermo (b).	54
4.1.4	Zona este de la lengua glaciar en donde se puede apreciar un adelgazamiento progresivo, siendo aun mayor posterior al año 2011, colores amarillos hacia colores en tonos rojos.	55
4.1.5	Glaciar Cono (norte) y glaciar Bertacchi (sur) con su respectiva variación en colores (fríos y cálidos) a lo largo del tiempo (a) y zona de glaciar Murallón con un claro adelgazamiento en la zona sur(b).	56

4.1.6. Sección perdida por el glaciar Upsala posterior al año 2011 demarcada en un rectángulo rojo, posterior al año 2011 no fue considerada dentro de la delimitación.	56
4.1.7. Delimitaciones de cada año del glaciar Perito Moreno. Con el blanco indicando el año inicial del estudio (1997) pasando de tonos fríos (azul, celeste, verde). A tonos cálidos (amarillos, rojizos) para años más actuales, hasta el negro representando los años más recientes (2021).	57
4.1.8. Brazo Perito Moreno con sus respectivas delimitaciones (a). Normalized Difference Water Index de la misma zona para el año 2021 (b), con pequeñas masas de agua presentándose en esta zona (zonas en azul) tanto en las zonas norte y sur del brazo. Este fenómeno de generación de masas de agua no se había apreciado anteriormente.	58
4.2.1. Cambios de la superficie total en km^2 del glaciar Upsala, entre 1997 y 2021(a) en el cuadrado de la esquina inferior izquierda el valor de la pendiente de la serie. Variaciones de superficie en km^2 entre años 1997 a 2021 (b), presentada en cuadrado de la esquina inferior izquierda pendiente de la serie y promedio de pérdida entre 1997 y 2021. En línea negra presentando el límite del valor 0 y ambos con su pendiente presentada en línea punteada roja.	60
4.2.2. Cambios de la superficie total en km^2 del glaciar Perito Moreno, entre 1997 y 2021(a) en el cuadrado de la esquina inferior izquierda el valor de la pendiente de la serie. Variaciones de superficie en km^2 entre años 1997 a 2021 (b), presentada en cuadrado de la esquina inferior izquierda pendiente de la serie y promedio de pérdida entre 1997 y 2021. En línea negra presentando el límite del valor 0 y ambos con su pendiente presentada en línea punteada roja.	61
4.3.1. Variación de volumen para el glaciar Perito Moreno en km^3 (a). Presentando los cambio en los rectángulos azules, significando pérdida de volumen para valores negativos y ganancia para positivos. Diferencia anual en rectángulos rojos realizando la diferencia entre años para los periodos 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017. Transformación de volumen a masa perdida (ganada) por el glaciar para los mismos periodos que en el caso del volumen (b).	63
4.3.2. Variación de volumen para el glaciar Perito Moreno en km^3 (a). Transformación de volumen a masa perdida (ganada) por el glaciar para los mismos periodos que en el caso del volumen (b).	64
4.4.1. Variación teórica del nivel del lago Argentino solo considerando el aporte neto por derretimiento del glaciar Upsala sobre los 190 m.s.n.m. En rectángulos azules considera los periodos con diferencias de 4 años (2005-2009, 2009-2013, 2013-2017, 2017-2021) y en rojo variaciones anuales entre 2013 y 2017.	65

4.4.2.Variación teórica del nivel del lago Argentino (a) y Brazo rico (b) solo considerando el aporte neto por derretimiento del glaciar Perito Moreno sobre los 190 m.s.n.m.	67
4.5.1.Comparación entre superficie total de glaciar Upsala a lo largo de los años, en azul temperatura promedio del campo obtenido a partir de ERA5, en rojo variación de superficie para GPM(a). Comparación entre variación de superficie para el glaciar Upsala en rojo y misma temperatura obtenida a partir de ERA5 en azul (b).	69
4.5.2.Comparación entre superficie total de glaciar Perito Moreno a lo largo de los años, en azul temperatura promedio del campo obtenido a partir de ERA5, en rojo variación de superficie para GPM(a). Comparación entre variación de superficie para el glaciar Perito Moreno en rojo y misma temperatura obtenida a partir de ERA5 en azul (b).	70
4.5.3.Comparación entre superficie total(a) de glaciar Upsala a lo largo de los años. En azul la precipitación acumulada para cada año obtenida a partir de datos CR2MET en la zona del Glaciar O'Higgins, en rojo superficie glaciar. Comparación entre variación de superficie (b) para el glaciar Upsala en rojo y misma precipitación obtenida a partir de CR2MET en azul.	71
4.5.4.Comparación entre superficie total(a) de glaciar Perito Moreno a lo largo de los años, en azul precipitación acumulada para cada año normalizada obtenida a partir de datos CR2MET en la zona del glaciar O'Higgins, en rojo superficie glaciar Perito Moreno normalizada. Comparación entre variación de superficie (b) para el glaciar Perito Moreno en rojo y misma precipitación obtenida a partir de CR2MET en azul.	72
4.5.5.Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de superficie total del glaciar Upsala, Ambas series con pendiente.	73
4.5.6.Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de superficie total del glaciar Upsala, Ambas series sin pendiente.	75
4.5.7.Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de superficie total del glaciar Perito Moreno, Ambas series con pendiente.	76
4.5.8.Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de superficie total del glaciar Perito Moreno, Ambas series sin pendiente.	78

4.5.9. Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de variación de superficie del glaciar Upsala, Ambas series con pendiente.	79
4.5.10. Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de variación de superficie del glaciar Upsala, Ambas series sin pendiente.	81
4.5.11. Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de variación de superficie del glaciar Perito Moreno, Ambas series con pendiente.	82
4.5.12. Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de variación de superficie del glaciar Perito Moreno, Ambas series sin pendiente.	84
5.4.1. Comparación entre series de temperatura y superficie de glaciar Upsala, ambas sin tendencia con 1 año de desfase en la serie de temperatura (arriba) y 5 años de desfase (abajo) las cuáles serán las que presenten mayores correlaciones para las series sin tendencia considerando el glaciar Upsala.	89
5.4.2. Comparación entre series de temperatura y superficie de glaciar Perito Moreno, ambas sin tendencia con 1 año de desfase en la serie de temperatura (arriba) y 5 años de desfase (abajo) las cuáles serán las que presenten mayores correlaciones para las series sin tendencia considerando el glaciar Upsala.	90

Capítulo 1

Introducción

1.1. Histórico

1.1.1. Campos de Hielo Sur

Los Campos de Hielo Sur (CHS) son hielos continentales ubicados en el cono sur de América del Sur. Con una extensión de aproximadamente 12.500 km^2 (Sakakibara and Sugiyama, 2014), se considera la tercera extensión de hielo continental más grande del mundo, después de la Antártica y Groenlandia. Los CHS se extienden de sur a norte alrededor de 350 kilómetros y comparten territorio entre Chile y Argentina (Figura 1.1.1).

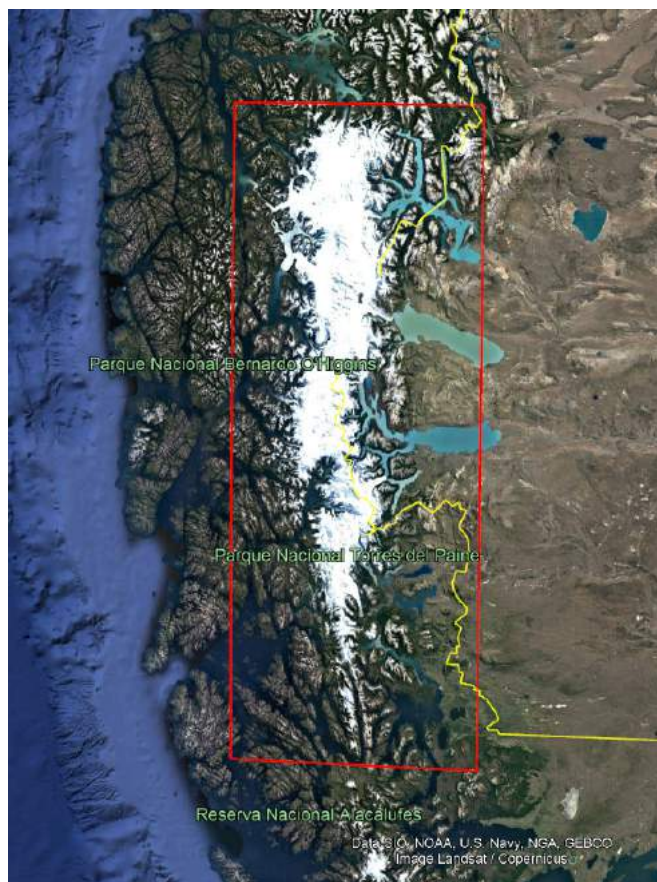


Figura 1.1.1: Campos de hielo sur considerado toda el área cubierta por hielo dentro de la sección roja, delimitación política Chile-Argentina en amarillo

El área limítrofe entre ambos países, demarcada por el Tratado de límites de 1881, ha sido objeto de disputas territoriales a lo largo de los años. En particular, la zona entre el Cerro Daudet y el área al noreste del lago del desierto (aproximadamente 48.97°S y 72.79°O , conocida como Hito 62) ha sido problemática. La región entre Hito 62 y el Monte Fitz Roy fue resuelta por un tribunal internacional en 1994, en el contexto de la controversia conocida como “Disputa de la laguna del desierto” (1965-1995). El fallo favoreció principalmente la delimitación propuesta por Argentina, como se muestra en la figura 1.1.2. El fallo se basó en gran medida en la decisión del rey británico Eduardo VII en 1902 y en el mapa trazado por el capitán británico Herbert Leland Crosthwait después de la decisión (Ortiz de Filippi, 1991).



Figura 1.1.2: Mapa obtenido del reportaje “A 10 años de una dolorosa pérdida total” publicado por El Mercurio.

Después de la Disputa de la Laguna del Desierto, fue necesario definir el sector entre Monte Fitz Roy y Cerro Daudet. Según el “Acuerdo para precisar el recorrido del límite desde el Monte Fitz Roy hasta el Cerro Daudet” de 1998, se considera una zona pendiente de demarcación un territorio rectangular que se extiende desde la zona norte del Monte Fitz-Roy hasta el Cerro Murallón (figura 1.1.3). Este conflicto aún no se ha resuelto. El “Litigio del campo de hielo sur patagónico”, especialmente durante la disputa de la Laguna del Desierto, ha provocado tensiones y disputas entre Chile y Argentina, y persiste hasta el día de hoy. En 2018, se incluyeron en el inventario de hielos de Argentina zonas que, según Chile y las autoridades de las zonas de hielo, están en disputa con Argentina.



Figura 1.1.3: Zona en negro como la zona aun pendiente por delimitar según tratado de 1998. Imagen referencial obtenida de reportaje: “Chile y Argentina: Un conflicto histórico en Campos de Hielo Sur” por Nicolás Vivar para Fundación Glaciares Chilenos, Octubre 2020.

1.1.2. Glaciar Upsala

El Glaciar Upsala, ubicado en el Parque Nacional “Los Glaciares” (PLG), es un glaciar de valle que termina en el Lago Argentino. Fue nombrado en 1908 por Klaus August Jacobson, un geólogo sueco que fue acompañado en su expedición por Francisco Pascasio Moreno (Perito Moreno). Nombraron al glaciar de esta manera en honor a la Universidad sueca de Upsala, que colaboró en la investigación de este glaciar.

En el contexto de este trabajo, se presenta como una gran extensión de hielo que termina en el Brazo Upsala, que a su vez conecta con el Lago Argentino. Sin embargo, dependiendo de las definiciones, este glaciar puede considerarse

un complejo de la unión de varios glaciares. Dentro de este complejo, el glaciar Upsala es el de mayor extensión, y el resto de los glaciares están conectados a su zona de ablación. Al este de la lengua del glaciar más al sur se encuentra el glaciar Bertacchi, el más cercano al glaciar Upsala y que tiene la mayor zona de acumulación después de este. Más al norte se encuentran los glaciares Cono y Murallón. Los nombres de estos glaciares corresponden a las cumbres o montes a los que están asociados, dados por diferentes expediciones realizadas en la zona.

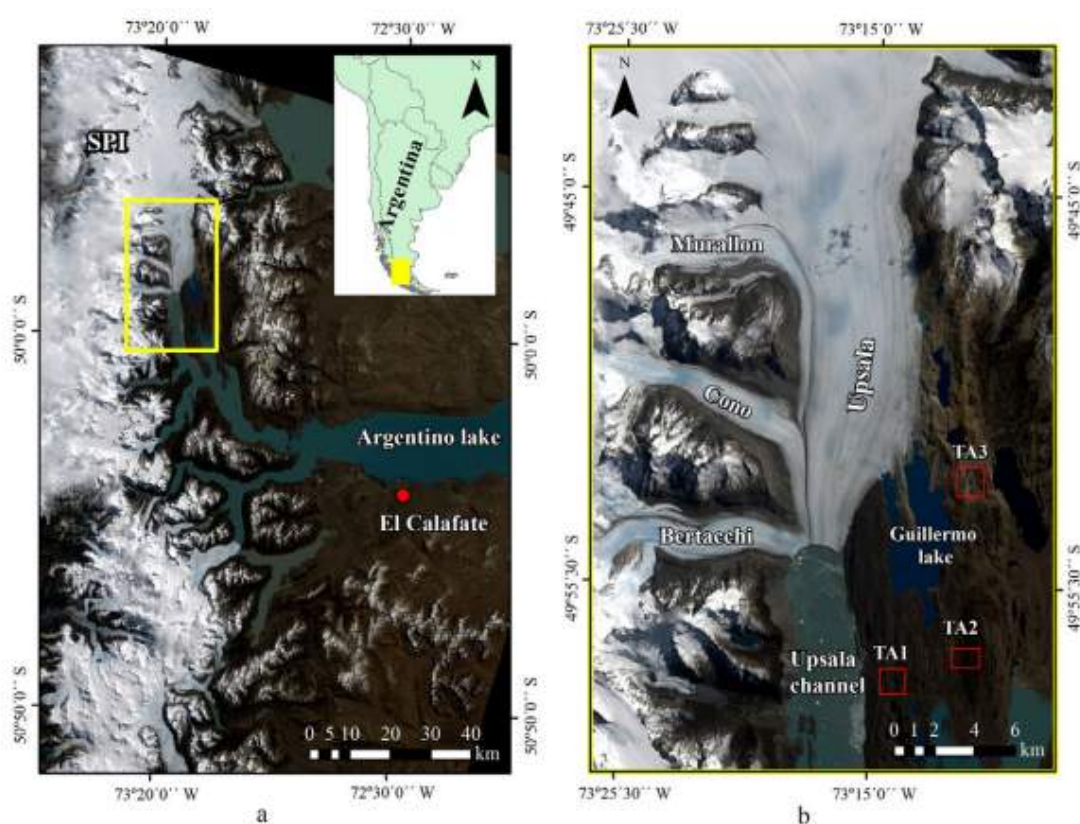


Figura 1.1.4: Distintos glaciares presentes en el complejo del glaciar Upsala, de sur a norte glaciares Bertacchi, Cono y Murallón, todos estos conectados a la zona de ablación del mismo glaciar Upsala. Imagen obtenida de (Moragues et al., 2017)

1.1.3. Glaciar Perito Moreno

El Glaciar Perito Moreno (GPM), también ubicado en el PLG, es la principal atracción turística del parque y una de las principales de Argentina. Tiene una sección que termina en el Lago Argentino y otra que termina en una zona de acumulación de agua conocida como “Brazo Rico”. Ambas están unidas por el canal “Los Témpanos”.

Con respecto a la historia de este glaciar, antes del conflicto territorial entre Chile y Argentina, inicialmente fue denominado “Fernando Vidal”. Fue descubierto en 1879 por el Teniente de la Armada chilena, Juan Tomás Rogers, y lleva el nombre del hidrógrafo fundador del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). Posteriormente, tras ser adjudicado al territorio argentino, recibió un nuevo nombre: “Glaciar Bismarck”, otorgado por Rodolfo Hauthal. Finalmente, tras numerosos estudios geológicos y geográficos, fue rebautizado como “Perito Moreno”. Este último nombre fue asignado por el Teniente de la Armada argentina, A.R Iglesias, en honor a Francisco Pascasio Moreno, un reconocido explorador, antropólogo y geógrafo argentino experto en la zona austral (Rogers, 1880; Martinic, 1977).

Además, el GPM posee una característica particular relacionada con su avance. Cada cierto tiempo, se separa una zona del Lago Argentino, formando una especie de dique entre el glaciar y las zonas de roca que se encuentran frente a él. Así, se genera el llamado Brazo Rico, que se eleva unos 30 metros sobre el nivel de agua del Lago Argentino. Debido a la erosión causada por el agua, la temperatura, se forma una especie de puente bajo esta gran masa de hielo. Este puente une el frente del glaciar con las zonas rocosas opuestas mediante un viaducto, permitiendo el flujo de una gran cantidad de agua desde el Brazo Rico al Lago Argentino. Enseguida, irregularmente, es decir sin una periodicidad fija, este puente de hielo colapsa, generando un espectáculo hidrológico y turístico. Desde aproximadamente 1917, se han registrado unos 25 colapsos en total, siendo los más recientes en 2018, 2013, 2012, 2008, 2006 y 2004 (Heinsheimer, 1958; Aniya, 1992; Aniya et al., 1997).

1.2. Glaciares

Hay varias definiciones de glaciares, pero una de las más destacadas y utilizadas es la proporcionada por el IPCC. Define los glaciares como una “masa permanente de hielo sobre tierra originada por nieve comprimida; muestra evidencias del flujo pasado y presente (mediante deformación interna y/o deslizamiento de su base) y está constreñido por el estrés interno y por el rozamiento de su base y de sus lados. Los glaciares se mantienen por la acumulación de nieve en grandes altitudes, compensada por la fusión en altitudes bajas y por la descarga vertida al mar”(IPCC, 2022).

Teniendo esto en consideración los glaciares se forman en zonas donde la

acumulación de nieve en época invernal es mayor a la nieve que se funde ante el aumento de temperaturas en el verano, preferentemente en entornos cordilleranos, polares o subpolares (Rivera et al., 2016). Los glaciares pueden ser clasificados a partir de su tamaño, temperatura y forma (Panchuk, 2019).

- Glaciaretos: glaciares pequeños con superficies menores a 0.25 km^2 .
- Glaciares de montaña: Ubicados en partes altas de una montaña y donde la evacuación desde las zonas de acumulación se da por medio de una lengua glacial pequeña.
- Glaciares efluentes: Forma parte de un campo de hielo, su zona de acumulación se encuentra compuesta por una meseta en altura o plateau. A partir de su temperatura pueden ser clasificados como:
 - Glaciares fríos: Con una temperatura inferior a 0°C .
 - Glaciares temperados: Posee en toda su masa la temperatura de fusión de hielo. La temperatura del punto de fusión varía con la presión, que depende de forma directa del espesor de hielo, su densidad y aceleración de gravedad.
 - Glaciares politermales: Los cuales poseen hielo tanto la temperatura de fusión como inferior a 0°C

Los glaciares son especialmente susceptibles a los cambios en variables meteorológicas como la precipitación o temperatura. Esto explica por qué la disminución de la precipitación y el aumento constante de las temperaturas, sobre todo a finales del siglo XX y principios del XXI, han contribuido al retroceso sostenido de los frentes glaciares y a la pérdida de área y volumen total de estos en Sudamérica (Aniya et al., 1997; Casassa, 1995; Dussaillant et al., 2019).

1.2.1. Zonas de un glaciar

Para entender completamente un glaciar, es fundamental conocer sus distintas secciones. Al examinar un perfil transversal de un glaciar, se distinguen dos zonas principales: la de acumulación y la de ablación.

La zona de acumulación se considera el sector donde el glaciar gana masa, principalmente debido a la precipitación en forma de nieve. En contraposición, la zona de ablación es donde se pierde masa, esto como resultado del derretimiento de la nieve o del hielo superficial. Estas dos áreas del glaciar están demarcadas

por la “Línea de Equilibrio Altitudinal” o ELA. En esta línea, el balance de masa —o sea, la comparación entre la masa obtenida por la caída de nieve y la pérdida por derretimiento— es igual a cero.

Dentro de estas dos principales secciones es posible subdividir cada una en varias partes, dependiendo de cada una de las características que poseen ([Alley, 2011](#)), vistas desde la sección más alta son las siguientes:

- Zona de nieve seca: Zona donde no ocurre derretimiento en ningún momento del año demarcada desde la “línea de nieve seca” hacia arriba.
- Zona de percolación: Sección donde hay una pequeña parte de derretimiento superficial. Es posible observar una corta distancia de percolación a través de la nieve a 0°C antes de recongelarse. En caso de encontrarse con una superficie impermeable esta se distribuirá hacia los lados, cabe recalcar que al momento de congelarse un gramo de agua se libera suficiente calor latente para aumentar en un grado 160g de agua siendo así el factor más importante de calentamiento de la nieve. En esta zona por razones evidentes hay una disminución de la altura en los periodos de verano debido al mayor derretimiento en esta. Siendo el limite de esta zona la “línea de nieve húmeda”.
- Zona de nieve húmeda: En esta sección será donde se percola gran parte del del calentamiento de la nieve hasta los 0°C, este derretimiento y movimiento ocurre de igual manera en la parte más baja de la “zona de percolación”.
- Zona superpuesta de hielo: En la zona de percolación y nieve húmeda están compuestas por múltiples capas de hielo, sin embargo, en altitudes más bajas existe demasiado derretimiento de nieve por lo que estas mismas capas se combinan en una masa continua, esto es llamado “Zona superpuesta de hielo”. Pese a que se presenta posterior a la “línea de nieve” es posible observar esta sección bajo el firn de la zona de nieve húmeda. Para determinar la línea de nieve, al final del periodo de derretimiento se delimita el borde entre la nieve con el firn, el término de la zona de superpuesta de hielo es la ya mencionada ELA.
- Zona de ablación: Finalmente bajo la línea de equilibrio es la zona que se presenta a menor altitud, en donde normalmente hay una pérdida de masa, debido a que la nieve acumulada en esta es menor que la nieve perdida por los distintos procesos que ocurren en el glaciar. A medida que el glaciar va

perdiendo masa la extensión de la zona de ablación irá subiendo, abarcando más la zona donde haya presencia de firn.

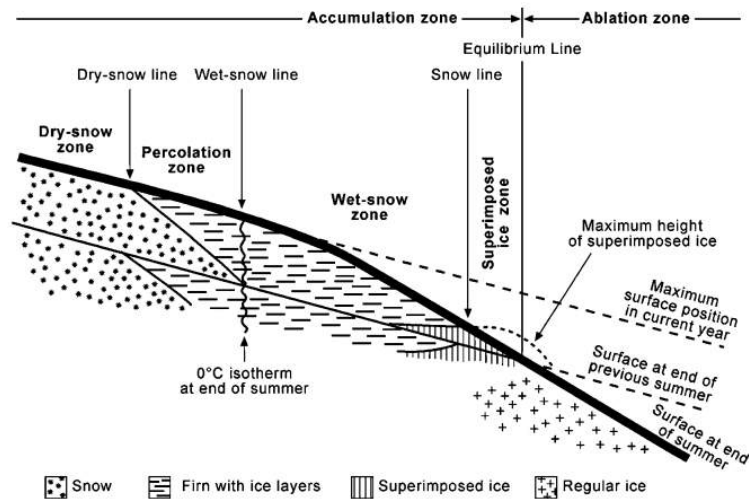


Figura 1.2.1: Zonas del glaciar subdividas por lo planteado en (Müller, 1962), haciendo diferencia entre Zona de nieve seca, de percolación, nieve húmeda, de hielo superpuesto y zona de ablación, con sus respectivas líneas de separación. Imagen obtenida en (Alley, 2011)

Pese a que se definen claramente estas zonas de un glaciar no todos los casos presentarán en totalidad estas secciones, por ejemplo, en el caso de la zona de nieve seca solo es posible encontrarla en glaciar a una gran altura (principalmente en Groenlandia o la Antártica). Como se presente cada una dependerá de la temperatura, altitud y características propias del glaciar que se esté estudiando.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

Cuantificar el aporte de agua -en términos de volumen y nivel del lago- de los glaciares Upsala y Perito Moreno al Lago Argentino y al Brazo Rico.

1.3.2. Objetivos específicos

- Obtener la variación de los glaciares Upsala y Perito Moreno tanto en superficie como en volumen a lo largo del periodo de estudio.

- Calcular la tasa de cambio de superficie de los glaciares estudiados.
- Analizar la relación entre la variación de los glaciares con datos climáticos tales como precipitación, temperatura y radiación.

1.3.3. Hipótesis

En este trabajo se plantea como hipótesis que la combinación de diferentes técnicas de percepción remota, como índices espectrales, falso color y modelos digitales de elevación, permite una mejor representación de los cambios glaciares que el uso de una sola técnica.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Percepción remota

Percepción remota (proveniente de *remote sensing* en inglés) es definida a grandes rasgos como la obtención de información de un objeto sin estar en contacto con el (Lintz and Simonett, 1976). En estos tiempos la información adquirida es mediante imágenes aéreas, obtenidas a partir de sensores que captan la radiación electromagnética emitida o reflejada por un objeto, para así obtener las características físicas de un lugar u objeto específico.

Dentro de la percepción remota existen distintos componentes los cuales son fuente de energía, cubierta terrestre y sensor. Dentro de este último es posible establecer una diferencia en resoluciones y así, poder discriminar el tipo de información que se está obteniendo. Esto se planteado por (Campbell and Wynne, 2011) se puede separar en:

- Resolución espacial.
- Resolución espectral.
- Resolución temporal.
- Resolución radiométrica (sensibilidad y rango dinámico).

2.1.1. Landsat

Landsat corresponde a múltiples misiones de lanzamiento de satélites las cuales fueron y son impulsadas por la Administración Nacional Aeronáutica y del espacio

(NASA) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Estas misiones son utilizadas principalmente para la administración y monitoreo de los recursos naturales (Ihlen and Zanter, 2019).

Puesto en marcha en 1972 con el lanzamiento de su primer satélite Landsat fue considerado uno de los pioneros de la percepción remota en todo el mundo, contribuyendo de gran manera al desarrollo de esta disciplina y a la utilización de satélites de manera comercial. Landsat consta de diversas misiones a lo largo del tiempo contando con Landsat 2, 3 y 4, enviados en 1975, 1978 y 1982 respectivamente. Lanzando Landsat 5 en 1984 con el mayor tiempo de duración en órbita (29 años) y finalizando en 2013 (Ihlen and Zanter, 2019).

Landsat 5 posee el sensor *Thematic Mapper* el cual consta de 7 bandas espectrales. Cada banda corresponde a un rango de longitud de onda dentro del espectro electromagnético y en donde todas constan con una resolución de 30 metros las cuales se presentan en el cuadro 2.1.1.

Banda	Landsat 5	Long. de onda (μm)	Resolución (Metros)
Banda 1	Azul (Blue)	0.45-0.52	30 m
Banda 2	Verde (Green)	0.52-0.60	30 m
Banda 3	Rojo (Red)	0.63-0.69	30 m
Banda 4	Infrarrojo cercano 1 (NIR-1)	0.76- 0.90	30 m
Banda 5	Infrarrojo cercano 2(NIR-2)	1.55-1.75	30 m
Banda 6	Infrarrojo termal (TIR)	10.40-12.50	30 m
Banda 7	Infrarrojo medio (MIR-2)	2.08-2.35	30 m

Cuadro 2.1.1: Bandas del espectro electromagnético cubierto por Landsat 5, con sus respectivas longitudes de onda. Valores extraídos de U.S. Geological Survey, 2016.

Para el caso de Landsat 8 la distribución de bandas con sus respectivas resoluciones está representados en el cuadro 2.1.2. Cabe recalcar que a partir de Landsat 7 fueron agregadas bandas con distintas resoluciones espaciales (banda pancromática o banda 8 a 15 metros de resolución) a diferencia de las misiones anteriores donde todas constaban de una resolución de 30 metros y posteriormente se agregaron las banda 10 y 11 (infrarrojo termal) 100 metros de resolución.

Banda	Landsat 8	Long. de onda (μm)	Resolución
Banda 1	Aerosoles de costa	0.43-0.45	30 m
Banda 2	Azul (Blue)	0.45-0.51	30 m
Banda 3	Verde (Green)	0.53-0.59	30 m
Banda 4	Rojo (Red)	0.64-0.67	30 m
Banda 5	Infrarrojo cercano (NIR)	0.85-0.88	30 m
Banda 6	I.C de onda corta 1 (SWIR-1)	1.57-1.65	30 m
Banda 7	I.C de onda corta 1 (SWIR-2)	2.11-2.29	30 m
Banda 8	Pancromatico	0.50-0.68	15 m
Banda 9	Cirrus	1.36-1.38	30 m
Banda 10	Infrarrojo termal 1 (TIRS-1)	10.6-11.19	100 m
Banda 11	Infrarrojo termal 2 (TIRS-2)	11.50-12.51	100 m

Cuadro 2.1.2: Bandas del espectro electromagnético cubierto por Landsat 8, con sus respectivas longitudes de onda y resoluciones para cada banda. Valores extraídos de U.S. Geological Survey, 2016.

Por su parte la ultima misión Landsat realizada corresponderá a la misión Landsat 9, lanzado en el año 2021. Con la principal diferencia con su antecesor de poseer el sensor “Thermal Infrared Sensor (TIRS)”. Con esto Landsat 9 puede detectar cambios sutiles en la superficie terrestre que Landsat 8 no puede ver. Además, Landsat 9 puede proporcionar información más detallada sobre la temperatura de la superficie terrestre.

Cuadro 2.1.3: Bandas de Landsat 9

Banda	Landsat 9	Longitudes de onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1	Coastal/Aerosol	0.43 - 0.45	30
Banda 2	Azul	0.45 - 0.51	30
Banda 3	Verde	0.53 - 0.59	30
Banda 4	Rojo	0.64 - 0.67	30
Banda 5	NIR	0.85 - 0.88	30
Banda 6	SWIR1	1.57 - 1.65	30
Banda 7	SWIR2	2.11 - 2.29	30
Banda 8	Pancromático	0.56 - 0,62	15
Banda 9	Cirrus	0.56 - 0.62	15
Banda 10	Infrarrojo termal (TIRS-1)	10.6 - 11.19	100
Banda 11	Infrarrojo termal (TIRS-2)	11.5 - 12.51	100

2.1.2. ASTER

El Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) es una misión cooperativa entre la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA) y el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (MITI). Este proyecto marcó un avance substancial en la resolución espacial desde su lanzamiento en 1999. Así, ASTER se convirtió en uno de los cinco instrumentos a bordo de la plataforma Terra. Cuenta con tres telescopios y un total de catorce bandas espectrales. Entre estas bandas, tres se ubican en el espectro visible (VNIR) con una resolución espacial de quince metros. Además, seis bandas corresponden al infrarrojo de onda corta (SWIR) con una resolución espacial de treinta metros y cinco bandas en el infrarrojo térmico (TIR) con noventa metros de resolución espacial (Abrams y Hook, 2002). (Abrams and Hook, 2002) 3.2.2.

Banda	Rango	Long. de onda (μm)
VNIR	Banda 1	0.52-0.60
	Banda 2	0.63-0.69
	Banda 3	0.76-0.86
SWIR	Banda 4	1.6-1.7
	Banda 5	2.14-2.18
	Banda 6	2.18-2.22
	Banda 7	2.23-2.28
	Banda 8	2.29-2.36
	Banda 9	2.36-2.46
TIR	Banda 10	8.12-8.47
	Banda 11	8.47-8.82
	Banda 12	8.92-9.27
	Banda 13	10.25-10.95
	Banda 14	10.95-11.65

Cuadro 2.1.4: Bandas del espectro electromagnético cubierto por ASTER, con sus respectivas longitudes de onda.

2.2. Combinación de bandas

Para poder generar un contraste entre las distintas áreas que quieren ser estudiadas, son realizadas distintas combinaciones de bandas considerando una imagen satelital multiespectral. Estas combinaciones se obtienen al unir tres bandas como RGB asignándole cada rango espectral a cada una de las bandas.

2.3. Modelos de digitales de elevación (DEM)

Los modelos digitales de elevación (DEM) se reconocen como una representación topográfica del terreno. Representando en la mayoría de los casos, la altura de la zona respecto al nivel medio del mar. Algunos de estos modelos, dependiendo de la base de datos usada, representan “teóricamente” solo el suelo desnudo (como SRTM, ASTER), sin considerar edificaciones, vegetación, etc. Sin embargo, otros sí consideran estas características (por ejemplo, LIDAR). Conocidos como modelos digitales de superficie (DSM) y modelos digitales de terreno (DTM).

En este trabajo, se han utilizado las bases de datos del modelo de elevación global ASTER (ASTER Global Versión 3 DEM o ASTER DMO V3) y la base de datos SRTM. Además del producto ASTER Digital Elevation Model and Orthorectified Registered Radiance at the Sensor (AST14DMO v003) este es un producto multi-archivo. Contiene el DEM correspondiente a la imagen del satélite durante el periodo de estudio. Adicionalmente, incluye 15 archivos orto rectificados que corresponden a las secciones de las bandas mencionadas anteriormente: visible e infrarrojo (VNIR), infrarrojo de onda corta (NIR) e infrarrojo termal (TIR) (Abrams et al., 2020).

Por otra parte, el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) es un proyecto de los Estados Unidos, realizado por el departamento de inteligencia geoespacial (NGA), el departamento de defensa (DOD) y la administración nacional de espacio y aeronáutica (NASA). Aunque la base de datos de topografía de ASTER es similar a las imágenes AST14DMO, no experimenta variaciones temporales. Adicionalmente, no enfrenta problemas como la nubosidad, la cual se explicará más adelante. Finalmente, SRTM contará con una resolución espacial de 30 metros mientras que ASTER GDEM cuenta con una resolución de 90 metros.

2.4. Procesos climáticos

2.4.1. Variabilidad climática en Sudamérica y la Patagonia

Hoy en día, se está viviendo un aumento sostenido de la temperatura global. Esto se debe principalmente a fuentes antrópicas, ligadas directamente a la sobreexplotación de recursos en la tierra (IPCC, 2022). Además, se debe a la generación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por parte del ser

humano, especialmente después de los años 70s (Hegerl et al., 2007).

Considerando la gran extensión meridional y los múltiples cambios en la orografía de Sudamérica, es posible observar una gran variedad de tipos de climas (Beck et al., 2018). Dependiendo de la zona, se presentan características climáticas tropicales, subtropicales y extratropical, dependiendo del lugar. Por eso, es necesario conocer la variabilidad climática a una escala local. Relacionando lo mencionado con anterioridad a escala global y considerar lo que pueda afectar en zonas específicas. Sin embargo, existen dos grandes componentes que remarcan la variabilidad climática, sobre todo en la sección subtropical y extratropical este del continente. Uno es la cordillera de los Andes, conocida cadena montañosa que recorre gran parte de Sudamérica. El otro es el anticiclón del Pacífico, un gran centro de alta presión presente frente a las costas de Chile con gran influencia sobre todo en la zona subtropical (Garreaud et al., 2009).

Para el caso de más al sur, en lugares subtropicales, el tipo de clima que se presenta en la Patagonia tiene sus propias características. En su lado occidental, está marcado en gran medida por la interacción que existe entre los vientos oeste provenientes del océano Pacífico con la cordillera de los Andes. Los vientos son forzados a subir, propiciando la precipitación orográfica en esta zona. Por eso, el lado oeste de la Patagonia tiene la principal característica de ser una zona templada y húmeda, con una media anual de entre 5000 y 7000 mm de precipitación. Esto está fuertemente correlacionado con el viento zonal a 850 hPa (U850), que aumenta la precipitación a medida que aumentan los vientos zonales en zonas al sur de los 40°S (Garreaud et al., 2013).

En contraste, en su sección oeste prevalecen fuertes vientos. Además, es una zona altamente árida, debido principalmente al fenómeno conocido como “rain-shadow effect” (Damseaux et al., 2020). En la sección de sotavento no hay presencia de lluvia debido a la precipitación orográfica que se genera en la zona de barlovento. En la Patagonia oriental, se puede apreciar un rápido deterioro de la vegetación a medida que uno se va moviendo más al este. En promedio, hay una precipitación de entre 500-700 mm año⁻¹ (Paruelo et al., 1998; Carrasco et al., 2002). Además, es una zona de vientos fuertes con condiciones propicias para la evaporación. La amplitud es de alrededor de 10°C, al comparar periodos de invierno y verano. Además de lo anteriormente mencionado, existe otro componente de importancia

que caracteriza la variabilidad climática de la zona. Estos son los conocidos como modos climáticos. Para la Patagonia, los de mayor importancia, o los que definen el clima en la zona, son principalmente dos. Uno es El Niño Southern Oscillation (ENSO), y el otro es el Southern Annular Mode (SAM). Este último es un modo de variabilidad climática de baja frecuencia. Está asociado principalmente a cambios de fuerza y posición de los jets polares presentes alrededor de la Antártica. Marca tendencias positivas en el verano del H.S, con aumento de la magnitud de los vientos oeste (westerlies) y desplazados más hacia el polo. Esto está asociado con la pérdida de ozono estratosférico (Fogt and Marshall, 2020). Para la zona de la Patagonia en su sección oeste, hay una fuerte correlación positiva entre las temperaturas a lo largo de esta (entre 40°S-54°S) con el índice del SAM. Al contrario, al realizar un análisis climático, este índice presenta una correlación negativa con los vientos zonales y la precipitación para las fechas de verano en el H.S (Moreno et al., 2014).

Al evaluar el calentamiento gradual del planeta y relacionándolo con la Patagonia, podemos observar que ha habido, al igual que en el contexto global, un aumento sostenido de las temperaturas (Masiokas et al., 2008; Jacques-Coper et al., 2021). Esto es de gran preocupación, principalmente debido a la gran cantidad de glaciares presentes en la zona. Estos son especialmente sensibles a los cambios de temperatura y se ven afectados de gran manera por esta (Haeberli and Beniston, 1998).

2.4.2. El Niño Oscilación del Sur (ENSO)

El Niño Oscilación del Sur o El Niño Southern Oscillation (ENOS) es uno de los fenómenos climáticos más estudiados a nivel mundial y por ende para la zona del Pacífico Sur. Corresponde a la fluctuación climática natural interanual más fuerte. Este fenómeno está asociado a variaciones en el gradiente zonal de la temperatura superficial del mar (TSM), además de variaciones del nivel del mar debido a cambios en los vientos alisios a lo largo del ecuador.

ENOS en su fase positiva (Fig. 2.4.1 a), c), nombrada simplemente como “El Niño”, se asocia a aumentos de la TSM en la zona del Pacífico ecuatorial y sur oriental, además de un dipolo con altas presiones sobre el Pacífico y bajas presiones sobre Indonesia. Por otro lado, en su fase negativa (Fig. 2.4.1 b), d) se observa una disminución de la TSM y un dipolo contrario al mencionado anteriormente,

fortaleciendo así el anticiclón del Pacífico presente frente a las costas de Chile. En su fase positiva, una anomalía positiva de TSM se relaciona con una disminución en el gradiente este-oeste del TSM en la celda de Walker, acarreado con esto una disminución de los vientos presentes en esta zona, reforzando así la misma anomalía de TSM. En su fase negativa, conocida como La Niña, se presenta un aumento del gradiente, resultando en un fortalecimiento de los vientos (Wang et al., 2016).

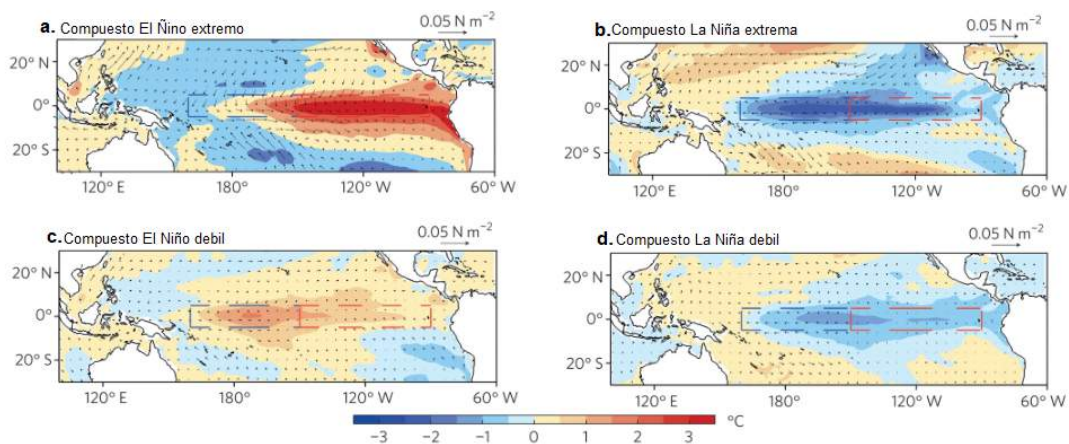


Figura 2.4.1: Ejemplos de las distintas fases de ENOS con: a) fase extrema positiva del ENOS, con altas anomalías negativas de temperatura. b) Fase negativa extrema donde hay grandes anomalías negativas de temperatura. c) Fase positiva moderada y d) Fase negativa moderada. Imagen extraída de (Cai et al., 2015)

La región del Niño 3.4, es una zona específica del Océano Pacífico tropical que se utiliza para monitorear y predecir los fenómenos climáticos asociados al El Niño y La Niña. Se encuentra aproximadamente entre las coordenadas de latitud 5°N-5°S y longitud 120°W-170°W, y es la combinación de las zonas de El Niño 3 y 4 (Fig. 2.4.2 a). Esta zona es utilizada para cuantificar la variación de la TSM y así poder generar el conocido como **El Niño 3.4 Index**. Este índice se calcula tomando el promedio de las anomalías de temperatura en esa área durante un período de tiempo específico, calculando la variación mensual tomando en cuenta el promedio de cambio del mes anterior y posterior a este.

Por lo general, se utiliza un período de referencia de 30 años para establecer este promedio, aunque los valores pueden variar en función de la fuente y el contexto específico.

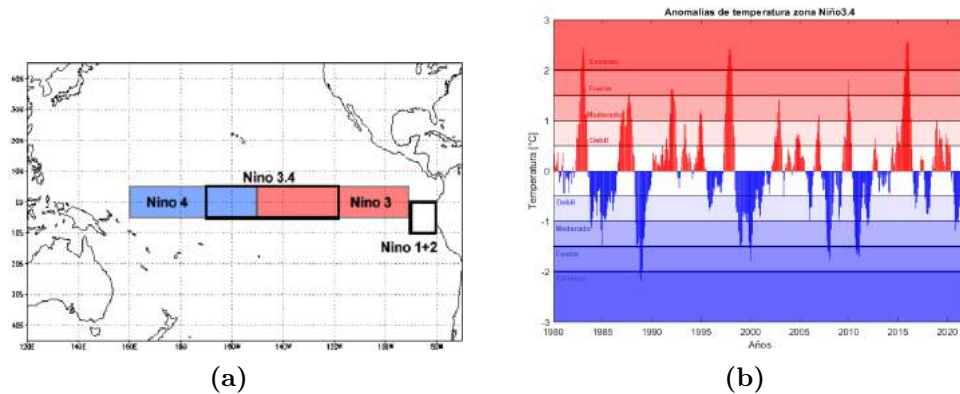


Figura 2.4.2: Zona del Niño 3 en rojo y el Niño 4 en azul, remarcada en rectángulo negro zona perteneciente a “El Niño 3.4” (a) Imagen obtenida de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Variación de la anomalía de TSM para la sección de El Niño 3.4 dando así como resultado “El Niño3.4 Index” (b), se muestra en colores rojos meses con anomalías positivas con valores sobre 0.5 años considerados como El Niño y valores inferiores a -0.5 como La Niña

Se considera una fase positiva (negativa) cuando las anomalías cada 3 meses obtenidas están por sobre (debajo) una temperatura de $+0.5^{\circ}\text{C}$ (-0.5°C). Adicionalmente, un evento puede ser catalogado dependiendo del umbral que exista en la anomalía de temperatura para ese periodo de tiempo. Estos son catalogados como débil cuando la anomalía sea mayor (menor) a $+0.5^{\circ}\text{C}$ (-0.5°C), moderado si es $+1^{\circ}\text{C}$ (-1°C), fuerte si es $+1.5^{\circ}\text{C}$ (-1.5°C) o extremo si es $>+2^{\circ}\text{C}$ ($<-2^{\circ}\text{C}$) (Wang et al., 2016).

Aunque el fenómeno del Niño es conocido por tener una influencia importante en la zona tropical cercana al ecuador, también existen estudios donde se puede ver la influencia de este en zonas subtropicales o incluso extratropicales. Particularmente, en la zona de la Patagonia oeste, un evento positivo fuerte de ENOS se asocia a un decrecimiento de los vientos zonales en estos sectores, además de una disminución de entre un 10-20 % de las precipitaciones anuales, comparando años neutros o donde haya presencia de La Niña. Estos efectos se pueden percibir directamente en el invierno del año en donde se detecte este fenómeno y pueden llegar a persistir hasta el otoño del año siguiente (Daniels and Veblen 2004; Schneider and Gies 2004).

Capítulo 3

Metodología

3.1. Zona de estudio

Este trabajo se enfoca en “El Parque Nacional Los Glaciares”. Situado entre 48°S a 52°S en latitud y 71°O a 74°O en longitud, esta área protegida federal se encuentra en la provincia de Santa Cruz, Argentina. Con una superficie de 7.230 km², es el parque nacional más grande del país. Dentro de este parque, los glaciares más importantes, tanto en superficie como en aporte de agua, son el glaciar Viedma, que alimenta el lago homónimo, y los glaciares Upsala y Perito Moreno. Estos últimos alimentan el Lago Argentino, incluyendo la zona conocida como brazo rico, que es alimentado por el último mencionado.

3.2. Datos

Se utilizaron imágenes satelitales provenientes de las misiones Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI/TIR para este estudio. En el caso de Landsat 7 ETM+, se usaron las denominadas imágenes “gap_mask”. Estas corresponden a la máscara de datos faltantes causados por fallos en el sensor posteriores al año 2003, permitiendo completar las imágenes que presentaban este problema. Además, se emplearon imágenes ASTER, con las cuales se pueden utilizar modelos digitales de elevación (DEM) para calcular la variación de volumen durante el periodo de estudio (2000 - 2021).

Nombre	Fecha de adquisición
Landsat 5 TM	
LT05_L1TP_231095_19980320_20200909_02_T1	20/03/1998
LT05_L1GS_231095_19990323_20200908_02_T2*	23/03/1999
LT05_L1TP_231095_19991118_20200907_02_T1	18/11/1999
LT05_L1TP_231095_20010312_20200906_02_T1	12/03/2001
LE07_L1TP_231095_20040312_20200915_02_T1	31/03/2002
LT05_L1TP_231095_20020331_20200905_02_T1*	13/04/2004
LE07_L1TP_231095_20040413_20200915_02_T1*	12/03/2004
LT05_L1TP_231095_20050219_20200902_02_T1	19/02/2005
LT05_L1TP_231095_20060222_20200901_02_T1	22/02/2006
LT05_L1GS_231095_20111002_20200820_02_T2*	02/10/2011
Landsat 7 TM+	
LE07_L1TP_231095_20070305_20200913_02_T1	05/03/2007
LE07_L1TP_231095_20080220_20200912_02_T1	20/02/2008
LE07_L1TP_231095_20090222_20200912_02_T1*	22/02/2009
LE07_L1TP_231095_20090326_20200912_02_T1*	26/03/2009
LE07_L1TP_231095_20091207_20200911_02_T1	07/12/2009
LT05_L1TP_231095_20110220_20200823_02_T1*	20/02/2011
LE07_L1TP_231095_20121012_20200908_02_T1	12/10/2012
LE07_L1TP_231095_20131031_20200907_02_T1	31/10/2013
LE07_L1TP_231095_20141002_20200905_02_T1	02/10/2014
LE07_L1TP_231095_20151106_20200903_02_T1	06/11/2015
Landsat 8 ETM	
LC08_L1TP_231095_20170204_20200905_02_T1	04/02/2017
LC08_L1TP_231095_20180327_20200901_02_T1	27/03/2018
LC08_L1TP_231095_20190109_20200830_02_T1	09/01/2019
LC08_L1TP_231095_20191109_20200825_02_T1	09/11/2019
LC08_L1TP_231095_20210303_20210312_02_T1	03/03/2021
LC08_L1TP_231095_20220117_20220123_02_T1	17/01/2022

Cuadro 3.2.1: Base de datos utilizada para delimitación de glaciares correspondiente a Landsat 5 TM, Landsat 7 TM+ y Landsat 8 ETM. Aquellas bases de datos con asteriscos (*) tuvieron consideraciones especiales para poder obtener la variación de superficie del glaciar

El criterio de selección de las imágenes fueron las con un PATH=231, ROW = 0,95. Una cobertura de nubosidad menor a un 20 % y en el verano extendido del año de la imagen (septiembre, octubre noviembre, diciembre- enero, febrero, marzo y abril). Es decir que en el caso de que una imagen sea de abril del año 2018 se considerará como una imagen del 2017.

En el caso de los años 2003 y 2009, fue necesario usar más de una imagen, sin que la diferencia entre ellas fuera superior a 3 meses. Esto se debió a la no disponibilidad de datos debido a la cobertura de nubes, lo que hizo necesario combinar dos o más imágenes distintas para representar adecuadamente la superficie del glaciar para ese año. Sin embargo, para los años 1999 y 2011, este procedimiento no fue posible. Por tanto, se buscó una imagen que mejor representara las zonas con mayores variaciones a lo largo del tiempo. Estas zonas de variación se discutirán más adelante en la sección de resultados.

Nombre	Fecha de adquisición
Glaciar Upsala	
AST14DMO_00301032005143631_20220504225102_30445	01/03/2005
AST14DMO_00312072009144340_20220504225102_30456	07/12/2009
AST14DMO_00304232010143713_20220504225012_21107	23/04/2010
AST14DMO_00302212011143657_20220504225102_30438	21/02/2011
AST14DMO_00303142013143733_20220504225052_27649	14/03/2013
AST14DMO_00301252013143719_20220504225112_31312	25/01/2013
AST14DMO_00303172014143715_20220504225032_21895	17/03/2014
AST14DMO_00304052015143743_20220504225032_21919	12/01/2015
AST14DMO_00312012015143749_20220504225022_21366	05/04/2015
AST14DMO_00310162016143730_20220504225032_21922	16/10/2016
AST14DMO_00310102017144349_20220504225042_26742	10/10/2017
AST14DMO_00311042017143732_20220504225042_26745	04/11/2017
AST14DMO_00310222018143810_20220504225042_26765	22/10/2018
AST14DMO_00310302021143217_20220504225052_27635	02/03/2021
AST14DMO_00311152021143200_20220504225052_27654	15/11/2021
Glaciar Perito Moreno	
AST14DMO_00312102001144101_20220504225102_30442	10/12/2001
AST14DMO_00302202005143630_20220504225012_21111	20/02/2005
AST14DMO_00301252013143728_20220504225012_21103	25/01/2013
AST14DMO_00312012015143758_20220504225022_21377	01/12/2015
AST14DMO_00303062016143726_20220504225012_21098	06/03/2016
AST14DMO_00310162016143739_20220504225032_21926	16/10/2016
AST14DMO_00310232016144348_20220504225042_26722	23/10/2016
AST14DMO_00310302021143226_20220504225052_27641	03/10/2021

Cuadro 3.2.2: Base de datos utilizada para cálculos de volumen mediante modelos de elevación digital ASTER. Estos están separados para glaciares Upsala y Perito Moreno, debido al área de cobertura que posee.

3.2.1. Datos ERA5

Este estudio empleó datos de reanálisis climáticos ERA5 globales, suministrados por ECMWF. Estos datos abarcan las variables de temperatura en superficie y radiación. Los mismos corresponden a datos mensuales desde 1940 hasta la actualidad, con una resolución espacial de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$. Para este estudio, se han tomado en cuenta las siguientes consideraciones:

Variable	Resolución	Periodo	Zona
T. Superficial ($^{\circ}\text{C}$)	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$	01/01/1996-31/12/2021	49-51°S, 72-74°O

Cuadro 3.2.3: Variables utilizadas para el estudio con su respectiva resolución y periodo extraído

3.2.2. Datos In-situ

Para validar estos datos, se utilizaron dos estaciones extraídas del explorador climático del Center for Climate and Resilience Research (CR2) (<https://explorador.cr2.cl/>). La primera es la estación con la variable de temperatura del aire media del **Lago Argentino** del Global Historical Climatology Network (GHCN). Esta se encuentra en la ciudad de El Calafate, Argentina, en las coordenadas 50.33°S y 72.3°O , a una altura de 220 metros. Sus mediciones regulares abarcan desde 1977 hasta finales del año 2000. Además, se seleccionó la estación **El Calafate Aero**, también del GHCN, ubicada al sur del Aeropuerto Internacional Comandante Armando. Esta estación, con coordenadas 50.26°S y 72.05°O y una altura de 204 metros, tiene datos desde marzo de 2003 hasta la actualidad.

Estación	Fuente	Ubicación	Periodo	Variable
Lago Argentino Arpt	GHCN	50.33°S - 72.3°O	1977-2003	Temp. Media
El Calafate Aero	GHCN	50.26°S - 72.05°O	2003-Presente	Temp. Media

Cuadro 3.2.4: Variables utilizadas para el estudio con su respectiva resolución y periodo extraído.

En cuanto a la precipitación, se utilizó la base de datos del CR2MET (<https://mawun.cr2.cl/>). Este producto grillado es generado por el CR2. Tiene una resolución de $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ en latitud-longitud, lo que equivale a unos 5 km (*cos(latitud)), y una resolución temporal diaria y mensual. Los datos abarcan desde 1979 hasta la actualidad, completándose el último periodo con una estación

meteorológica en las zonas disponibles. Para este trabajo, se utilizó la versión de datos mensuales para cada cálculo.

Esta base de datos se genera a partir de la regionalización estadística de datos obtenidos del reanálisis ERA-Interim. Los modelos estadísticos consideran la topografía local de cada sector. Además, se utilizan métodos estadísticos de flujo de humedad para obtener la precipitación de cada zona. Estas estimaciones son calibradas con observaciones meteorológicas que se recogen en diferentes estaciones a lo largo del país (Boisier et al., 2018).

3.2.3. GLIMS

Los datos del Global Land Ice Measurement from Space (GLIMS) (<https://www.glims.org/>) pertenecen a un proyecto del NSIDC (<https://nsidc.org/home>). Este proyecto busca generar una base de datos de outlines o contornos de varios glaciares alrededor del mundo, junto con otra información relevante sobre los mismos. Dicha base de datos incluirá el inventario global de glaciares (World Glacier Inventory) (WGMS, 1999), las fronteras del GLIMS Regional Center (http://www.glims.org/maps/nsidc_rc_table_public.html), información del Randolph Glacier Inventory (RGI) (<https://www.glims.org/RGI/>), así como los “bordes” o delimitaciones de los distintos glaciares. Cada glaciar presente en esta base de datos se identifica de mejor manera mediante un ID asignado. Para este trabajo, se utilizaron datos tanto del glaciar Perito Moreno como del glaciar Upsala (GPM: G286789E50575S, Upsala: G286639E49733S).

Pese a que se generan múltiples resultados para los distintos glaciares, la disponibilidad temporal de cada uno de estos no es muy amplia. Por ello, se realizan cálculos para cada glaciar con variaciones anuales. Sin embargo, los cálculos realizados antes de la década de 2010 no tendrán una alta resolución espacial. Esto significa que las variaciones serán más superficiales y no tan precisas como podrían ser con las imágenes Landsat utilizadas en este estudio.

En el caso del glaciar Upsala, este trabajo considerará como “Upsala” toda la zona que incluye tanto el propio glaciar Upsala, que termina en el Brazo Upsala, como los glaciares Murallón, Cono y Bertacchi, conteniendo las diferentes delimitaciones.

Nombre del glaciar	Periodo de obtención	Fuente
Glaciar Upsala	1870-01-01	Newcastle University
Glaciar Upsala	1986-01-14	Newcastle University
Glaciar Upsala	2000-06-15	University of Colorado
Glaciar Upsala	2001-08-04	Newcastle University
Glaciar Upsala	2005-02-20	IANIGLA
Glaciar Upsala	2005-02-20	University of Zurich-Irchel
Glaciar Upsala	2005-02-20	University of Zurich-Irchel
Glaciar Upsala	2007-09-06	Newcastle University
Glaciar Upsala	2016-03-12	University of Zurich-Irchel
Glaciar Perito Moreno	1870-01-01	Newcastle University
Glaciar Perito Moreno	1986-01-14	Newcastle University
Glaciar Perito Moreno	2000-06-15	University of Colorado
Glaciar Perito Moreno	2001-08-04	Newcastle University
Glaciar Perito Moreno	2001-12-03	Newcastle University
Glaciar Perito Moreno	2007-09-06	University of Colorado
Glaciar Perito Moreno	2016-02-02	University of Colorado

Cuadro 3.2.5: Datos obtenidos de GLIMS para los glaciares Perito Moreno y Upsala con su respectiva fecha de análisis y la organización que realizó el estudio de delimitación.

3.3. Pre-procesamiento

3.3.1. Landsat

Para trabajar con los datos Landsat, es necesario transformar la imagen de Niveles Digitales (DN) a radiancia. Este cálculo se basa en los valores proporcionados en (Ihlen y Zanter, 2019), como se indica en la ecuación 3.3.1.

$$L_{\lambda} = M_L \cdot Q_{cal} + A_L \quad (3.3.1)$$

Los factores de reescala específicos, tanto multiplicativos (M_L) como aditivos (A_L), son obtenidos del metadata de cada imagen Landsat:

- M_L = Factor de reescala específico multiplicativo de cada imagen Landsat (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el valor de cada banda).
- A_L = Factor de reescala específico aditivo cada imagen Landsat (RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el valor de cada banda).
- Q_{cal} = Valor del pixel calibrado (DN).

Una vez obtenido el valor de radiancia, se aplica la ecuación 3.3.2 para conseguir la reflectancia en el Tope de la Atmósfera o TOA (ρ_p). Este paso es crucial para normalizar la irradiancia solar y reducir la variabilidad entre escenas.

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{ESUN_\lambda \cdot \cos \theta_s} \quad (3.3.2)$$

Donde:

- L_λ = Radiancia espectral del sensor, expresada en $[W/m^2sr^{-1} \mu m^{-1}]$.
- d = Distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas (obtenidas a partir del metadata de la imagen).
- $ESUN_\lambda$ = Media de irradiancia espectral al tope de la atmósfera, en $[W/m^2 \mu m^{-1}]$.
- θ_s = Ángulo de zenit solar en grados, este es obtenido mediante $\theta_s = 90 - \theta_e$, con θ_e la elevación solar, obtenida a partir de la metadata de la imagen.

En el caso de las imágenes Landsat 8 existe factores de reescala que permite obtener directamente los valores de reflectancia desde DN a TOA.

El paso final implica la eliminación del efecto de la atmósfera (excluyendo las bandas SWIR-1, TIR y SWIR-2) en las imágenes. Esto da lugar a la reflectancia en superficie (ρ), que se obtiene a partir de la ecuación 3.3.3, como se describe en (Moran et al., 1992).

$$\rho = \frac{\pi \cdot (L_\lambda - L_p) \cdot d^2}{\tau_v \cdot ((ESUN_\lambda \cdot \cos \theta_s \cdot \tau_z) + E_\downarrow)} \quad (3.3.3)$$

Con:

- L_p = La radiancia espectral dispersada en dirección de y a la entrada del sensor, dentro del campo de visión de este. (**Path radiance**)
- τ_v = Tramitancia atmosférica considerando el camino desde la superficie hasta el sensor.
- τ_z = Tramitancia atmosférica a lo largo del camino desde el sol hasta el suelo de la superficie.
- $E_\downarrow$ = Irradiancia espectral entrante a la superficie, debido a la dispersión

del flujo solar en la atmósfera.

Para obtener el valor de L_p , se aplica la metodología **Dark-Object Subtraction** (DOS) (Chavez, 1996). Esta técnica corrige los datos bajo el supuesto de que algunos píxeles en la imagen están en completa sombra y la radiación que se recibe en el satélite se debe a la dispersión atmosférica. La ecuación 3.3.4 es utilizada en este proceso.

$$L_p = L_{min} - L_{DOI\%} \quad (3.3.4)$$

Donde:

- L_{min} = se define como la radiancia que corresponde a un valor de conteo digital, para el cual la suma de todos los píxeles con recuentos digitales inferiores o iguales a este valor, representa el 0,01 % de todos los píxeles de la imagen considerada (Sobrino et al., 2004). Este conteo digital mínimo se denota como DN_{min} .
- $L_{DOI\%}$ = Radiancia de un **objeto negro**, asumiendo que tiene una reflectancia de 0.01 %.

En el caso de imágenes Landsat el valor de L_{min} puede ser expresado en la ecuación 3.3.5.

$$L_{min} = M_L \cdot DN_{min} + A_L \quad (3.3.5)$$

La radiancia de un objeto negro se obtiene también de acuerdo con Sobrino et al. (2004), como se expresa en la ecuación 3.3.6.

$$L_{DOI\%} = 0,01 \cdot [(ESUN_\lambda \cdot \cos(\theta_s) \cdot \tau_z) + E_\downarrow] \cdot \frac{\tau_v}{(\pi \cdot d^2)} \quad (3.3.6)$$

Por lo tanto, la fórmula para la obtención de la radiancia esta expresada en la ecuación 3.3.7.

$$L_p = M_L \cdot DN_{min} + A_L - 0,01 \cdot [(ESUN_\lambda \cdot \cos(\theta_s) \cdot \tau_z) + E_\downarrow] \frac{\tau_v}{(\pi \cdot d^2)} \quad (3.3.7)$$

Existen múltiples técnicas asumiendo valores para los términos τ_v , τ_z y $E_\downarrow$. La más sencilla es **DOS1** (Moran et al., 1992) asumiendo $\tau_v = 1$, $\tau_z = 1$ y $E_\downarrow = 0$. Dando como resultado la radiancia expresada en la ecuación 3.3.8.

$$L_p = M_L \cdot DN_{min} + A_L - \frac{0,01 \cdot ESUN_\lambda \cdot \cos \theta_s}{(\pi \cdot d^2)} \quad (3.3.8)$$

Finalmente, este valor de radiancia se reemplaza en la ecuación 3.3.3. Esto proporciona el valor de reflectancia en superficie, eliminando así la influencia de la atmósfera.

3.3.2. ASTER

Para el preprocesamiento de las imágenes ASTER, es necesario aplicar una corrección atmosférica. Sin embargo, en ASTER solo se aplica a las bandas V1, V2 y V3N (Moran et al., 1992), ya que el efecto atmosférico no es relevante en las bandas SWIR y TIR. En cuanto a los datos ASTER, estas correcciones se aplicaron únicamente para comparar el comportamiento de los sensores de este con los datos de Landsat. No fue necesario trabajar con ninguna de las bandas de ASTER para este estudio.

Cabe recalcar que, a pesar de no utilizar las bandas espectrales de ASTER para este estudio, se utilizaron los Modelos de Elevación Digital (DEMs) extraídos de la misma base de datos. Para el preprocesamiento de los DEMs, era evidente que era necesario proyectar el ráster en las coordenadas geográficas correspondientes, en este caso, “WGS 1984 UTM Zona 18°S”. Además, para estos archivos, fue necesario verificar que no presentaran una cantidad considerable de nubosidad. Esto se debe a que el proceso de cálculo del DEM utiliza imágenes con un desfase temporal (Deilami et al., 2012), lo que puede resultar en nubosidad en el DEM, incluso si no se observa en las bandas visibles.

Posteriormente, se rellenaron los píxeles sin datos por medio de la herramienta “Fill” para corregir las imperfecciones en el Modelo de Elevación Digital. Esta herramienta completa las áreas problemáticas considerando los píxeles cercanos al píxel que necesita corrección. En la etapa final, se cambian los datos inválidos -que se representan mediante el número -9999, son reemplazados o corregidos-. Estos datos pueden ser tomados como valores numéricos válidos al calcular el volumen, lo que podría alterar el resultado final. Si es posible, se utiliza el DEM chequeado. Luego, se realiza la intersección entre el archivo DEM y el polígono generado del glaciar Upsala para ese año. El método de obtención de este polígono se explicará en una sección posterior. En última instancia, se utilizará el archivo DEM con la misma forma de la delimitación del glaciar para la fecha correspondiente. Este proceso se realizó de forma similar para los archivos GDEM y AST14DMO.

3.4. Índices espectrales

Primero, se calcularon los índices espectrales, que corresponden a cálculos matemáticos que utilizan diferentes bandas aplicadas a cada píxel de las imágenes. Se utilizan principalmente para diferenciar los tipos de cobertura presentes, considerando su reflectancia en diversas longitudes de onda. El índice espectral utilizado varía según la situación. Para este estudio, se utilizaron los siguientes índices para delimitar las zonas de los diferentes glaciares (Kour et al., 2015).

- El Índice de Normalizado Diferencial de Nieve (NDSI, por sus siglas en inglés): se utiliza habitualmente para hacer delimitaciones entre zonas con presencia de hielo o nieve y zonas que no poseen ninguna de las dos. Este índice no distinguirá de manera efectiva la diferencia entre zonas donde hay nieve de donde hay hielo, por lo que se utilizará principalmente para delimitar zonas con estas características. Sus valores oscilan entre -1 y 1, con valores altos indicando zonas con presencia de nieve 3.4.1

$$NDSI = \frac{Green - SWIR1}{Green + SWIR1} \quad (3.4.1)$$

Para Landsat 5, la banda verde (B3) corresponde a la banda 2, mientras que la banda de infrarrojo de onda corta se reemplaza por la banda 5, correspondiente a infrarrojo cercano 2 (NIR-2) (Figura. 3.4.1).

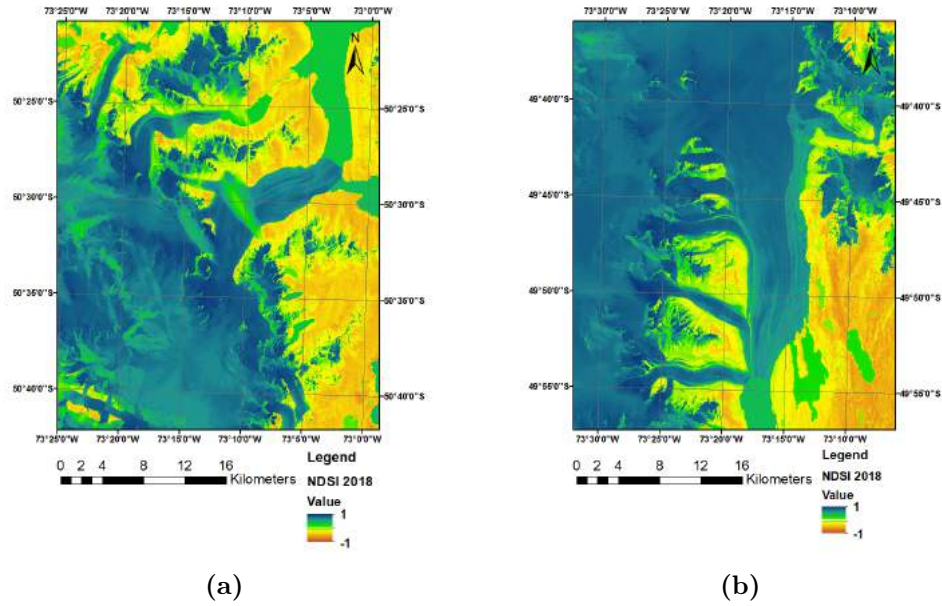


Figura 3.4.1: Ejemplo índice NDSI para GPM 2019 (a) y para glaciar Upsala (b) esto para enero del año 2019 el cual como se explica en secciones anteriores es tomado como el año 2018. Los tonos más azulados/verdes corresponderán a zonas en donde el índice detecte presencia de nieve o hielo. Mientras que zonas con colores más amarillos o naranjos zonas sin nieve.

- El Índice Normalizado Diferencial de Nieve/Hielo (NDSII, por sus siglas en inglés): es una adaptación del índice generado específicamente para el sensor VEGETATION de la misión SPOT. Se utiliza normalmente para diferenciar zonas de nieve con zonas de hielo. Sus valores van desde -1 a 1 presentada en 3.4.2.

$$NDSII = \frac{Red - SWIR1}{Red + SWIR1} \quad (3.4.2)$$

Para Landsat 5, la banda roja (B4) corresponde a la banda 3, mientras que la banda de infrarrojo de onda corta se reemplaza por la banda 5, correspondiente a infrarrojo cercano 2 (NIR-2), al igual que en el caso anterior (Figura 3.4.2).

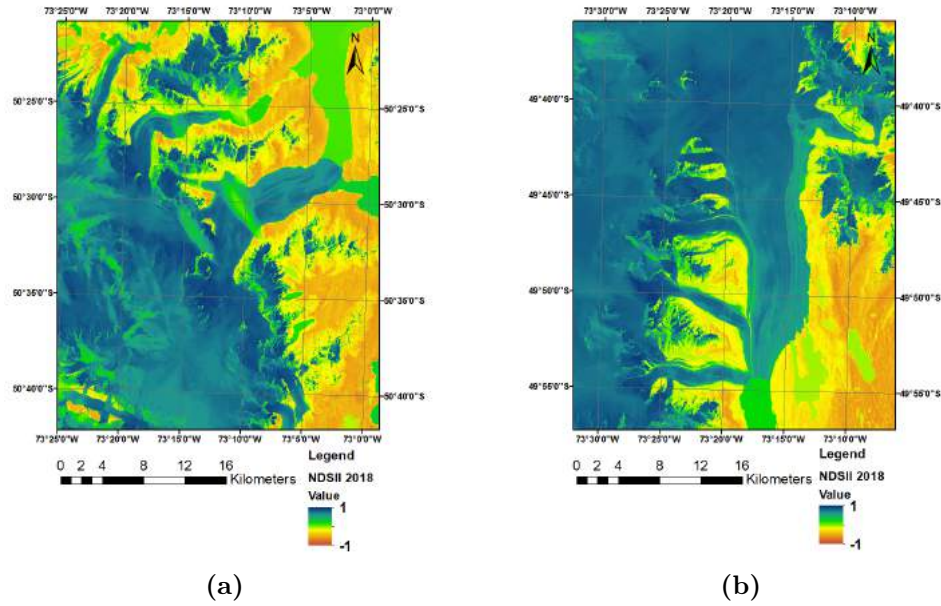


Figura 3.4.2: Ejemplo índice NDSII para GPM 2019 (a) y para glaciar Upsala (b) esto para Enero del año 2019 el cual como se explica en secciones anteriores es tomado como el año 2018. Los tonos más azulados/verdes corresponderán a zonas en donde el índice detecte presencia de nieve o hielo. Haciendo la diferencia entre nieve y hielo, dependiendo de los valores que tome el índice.

- El Índice Normalizado Diferencial de Agua (NDWI, por sus siglas en inglés): es útil para diferenciar zonas con presencia de agua. En el contexto de este estudio, se utilizó principalmente para diferenciar las zonas terminales de los glaciares, que a menudo se confunden con el comienzo de los lagos en los índices anteriores (Figura 3.4.3).

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (3.4.3)$$

Para usar este índice en Landsat 5, la banda 5 (NIR) se reemplaza por la banda 4.

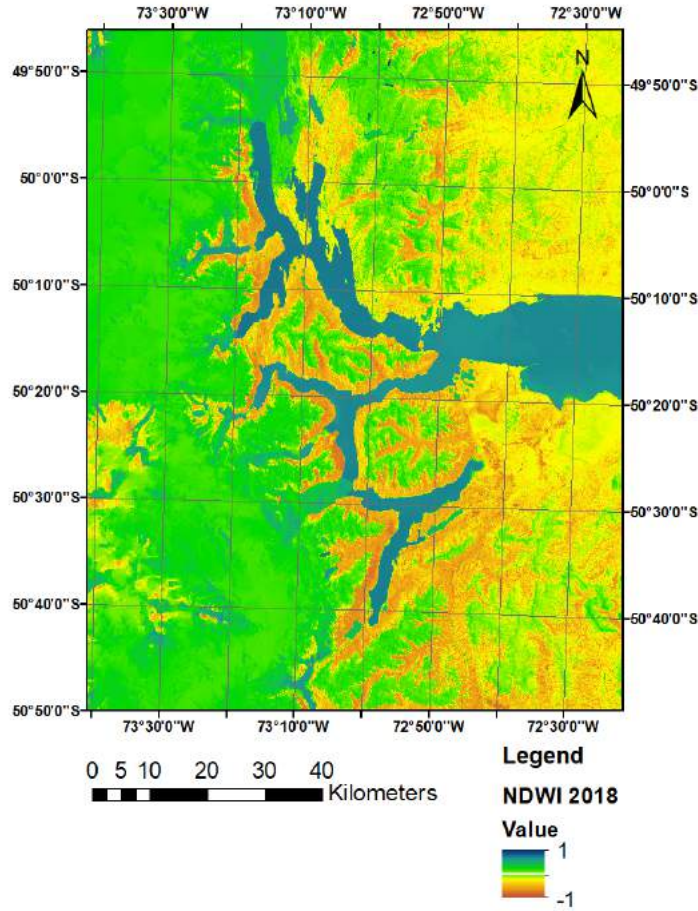


Figura 3.4.3: Ejemplo índice NDWI para toda la zona de estudio, poniendo especial énfasis en las zonas de lago Argentino esto para Enero del año 2019 el cual como se explica en secciones anteriores es tomado como el año 2018. Los tonos más azulados/verdes corresponderán a zonas en donde el índice detecte presencia de agua o mayor humedad.

- Finalmente, el Índice S3 es similar al NDSI, pero intenta minimizar el error en zonas donde existe tanto vegetación como nieve, combinando los índices NDSI y NDVI. Al igual que los otros, los valores oscilan entre -1 y 1 (Figura 3.4.4). Se calcula de la manera siguiente:

$$S3 = \frac{NIR(Red - SWIR1)}{(NIR + Red)(NIR + SWIR1)} \quad (3.4.4)$$

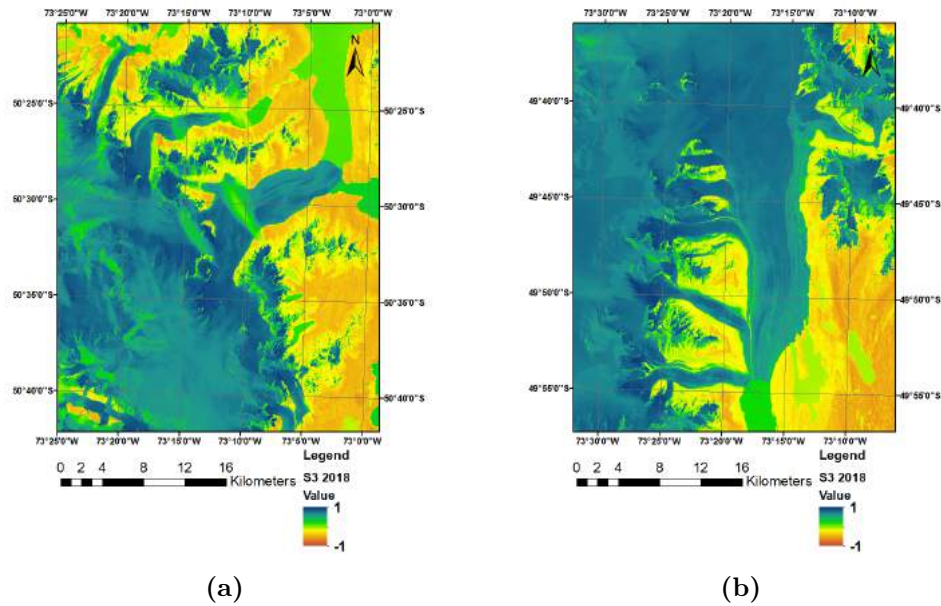


Figura 3.4.4: Ejemplo índice S3 para GPM 2019 (a) y para glaciar Upsala (b) esto para enero del año 2019 el cual como se explica en secciones anteriores es tomado como el año 2018. Los tonos más azulados/verdes corresponderán a zonas en donde el índice detecte presencia de nieve o hielo. Mientras que zonas con colores más amarillos o naranjos zonas sin nieve.

3.5. Delimitación de glaciares

La delimitación de glaciares se basó en los modelos de elevación digital (DEM) obtenidos de ASTER, así como en los índices espectrales. Primero, se delimitó la cuenca glaciar usando principalmente el modelo de elevación digital ASTER, con la herramienta Watershed de ArcGIS. Este límite fue luego corroborado con datos obtenidos de la plataforma GLIMS. El propósito era establecer el límite de la zona de acumulación glaciar y diferenciar los glaciares Upsala y Perito Moreno de otros glaciares presentes en los campos de hielo adyacentes.

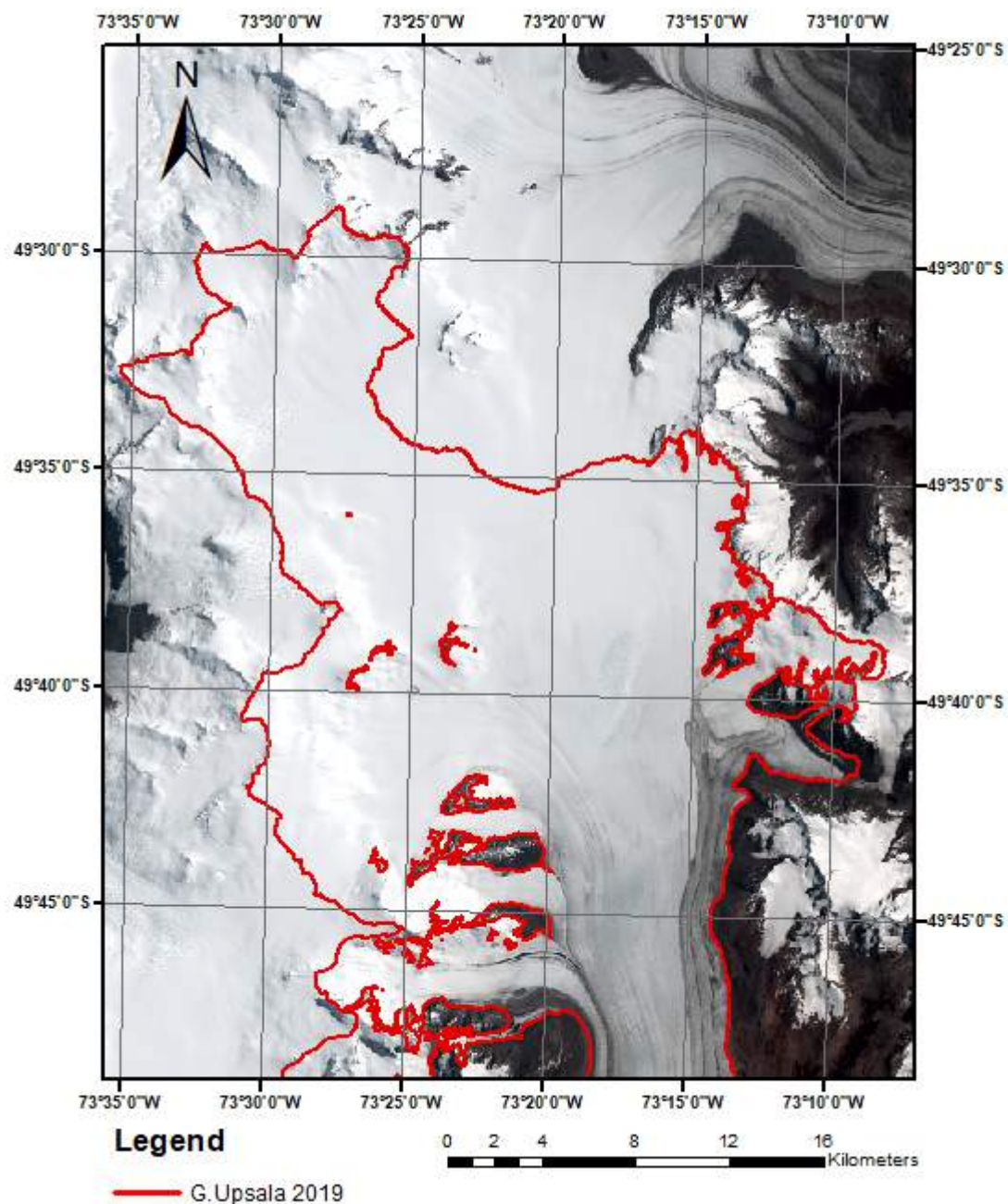


Figura 3.5.1: Ejemplo delimitación parte trasera glaciar Upsala para año 2019

Después, se aplicó el índice NDSI a la imagen para diferenciar zonas de nieve/hielo de zonas de suelo desnudo. Se aplicó un rango de $NDSI > 0.62$ (Copé de los Mozos, 2014), lo que significa que todo lo que supere este rango será considerado como nieve/hielo. Esto generó una máscara en la que se considerará 1 a las zonas

cubiertas de nieve y se establecerán como valores nulos (0) las zonas que estén por debajo de este rango 3.5.5.

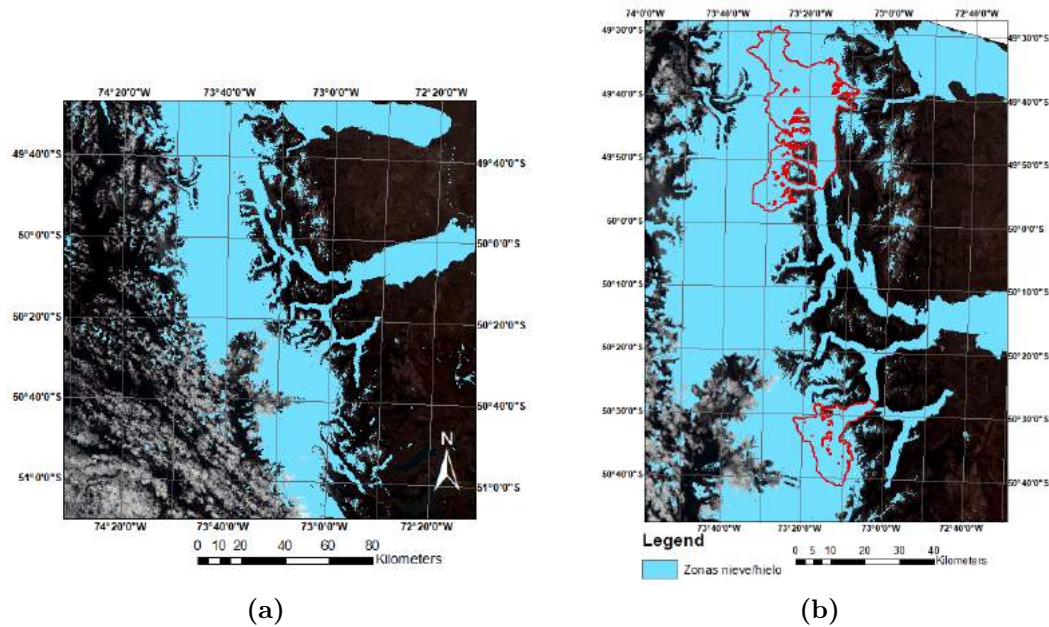


Figura 3.5.2: Ejemplo Máscara NDSI para el año 2019, en celeste, zonas con presencia de nieve/hielo según índice espectral(a). Demarcado en rojo al norte glaciar Upsala, al sur glaciar Perito Moreno (b).

Como se puede observar en la figura 3.5.5. Mediante el NDSI no fue posible diferenciar el frente glaciar del brazo Upsala para el glaciar del mismo nombre, ni del canal los Témpanos y Brazo Rico para el GPM. Debido a las características espectrales del hielo como del agua en esta zona. Para resolver este problema, se aplicó el Índice Normalizado Diferencial de Agua (NDWI). Con este índice, se generó una máscara de la misma forma que se hizo con el NDSI, pero considerando solo las masas de agua presentes en la zona.

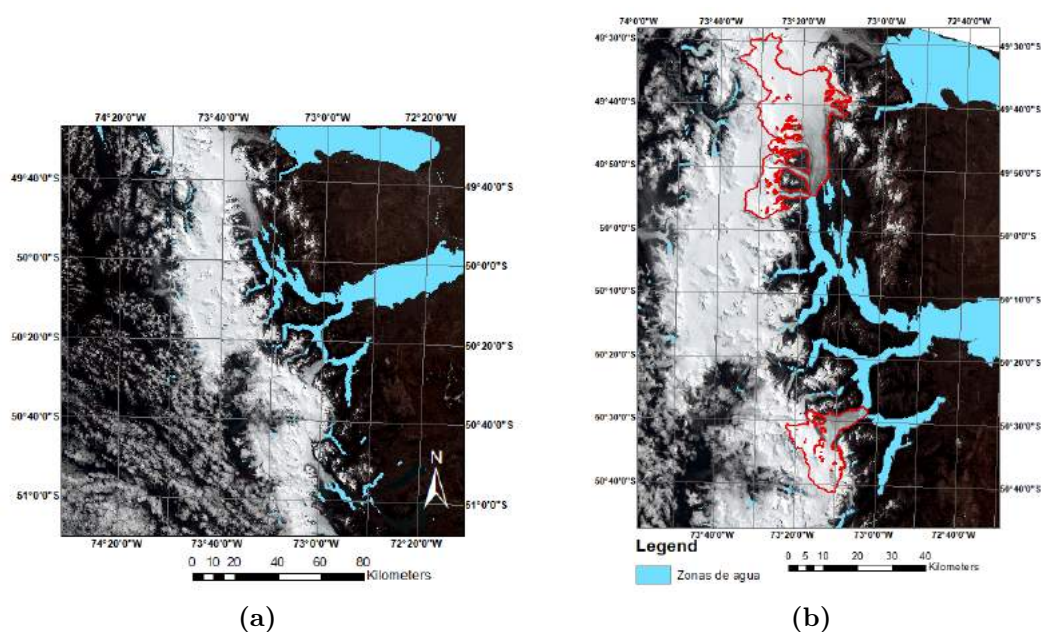


Figura 3.5.3: Ejemplo Mascara NDWI para glaciar Upsala 2019, en celeste zonas con presencia de agua según índice espectral, (b) demarcado en rojo al norte glaciar Upsala, al sur glaciar Perito Moreno.

Posteriormente, esta máscara fue sustraída de la creada para el NDSI, dando como resultado una delimitación solo de las zonas con presencia de nieve/hielo.

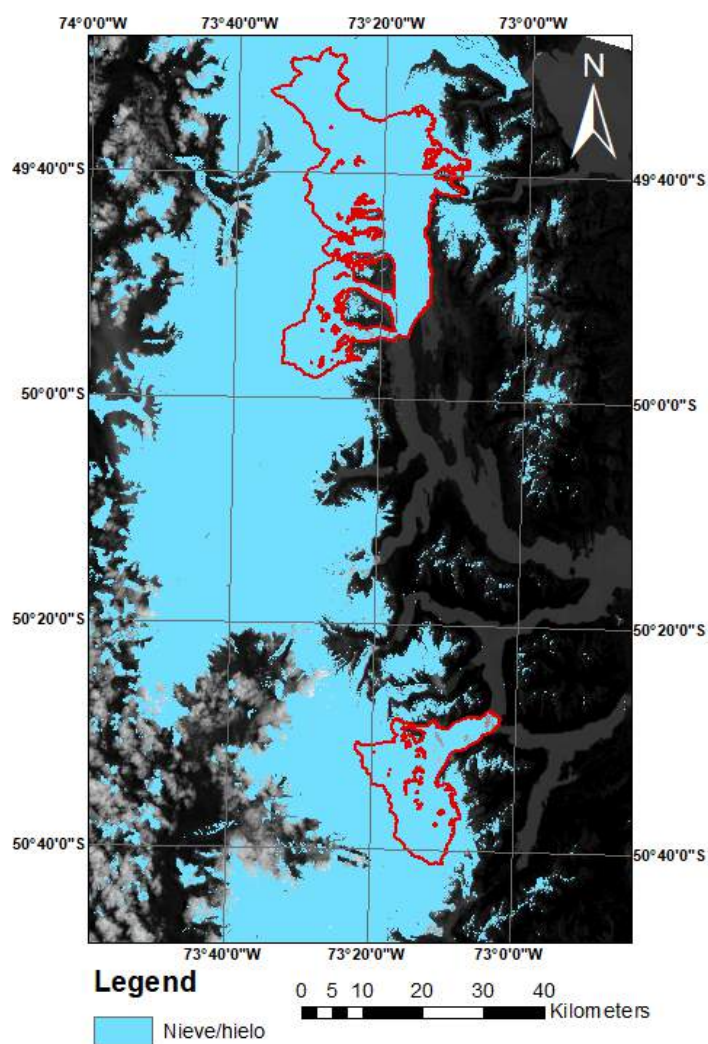


Figura 3.5.4: Mascara de zonas con nieve y hielo al realizar la substracción entre índice NDSI y NDWI

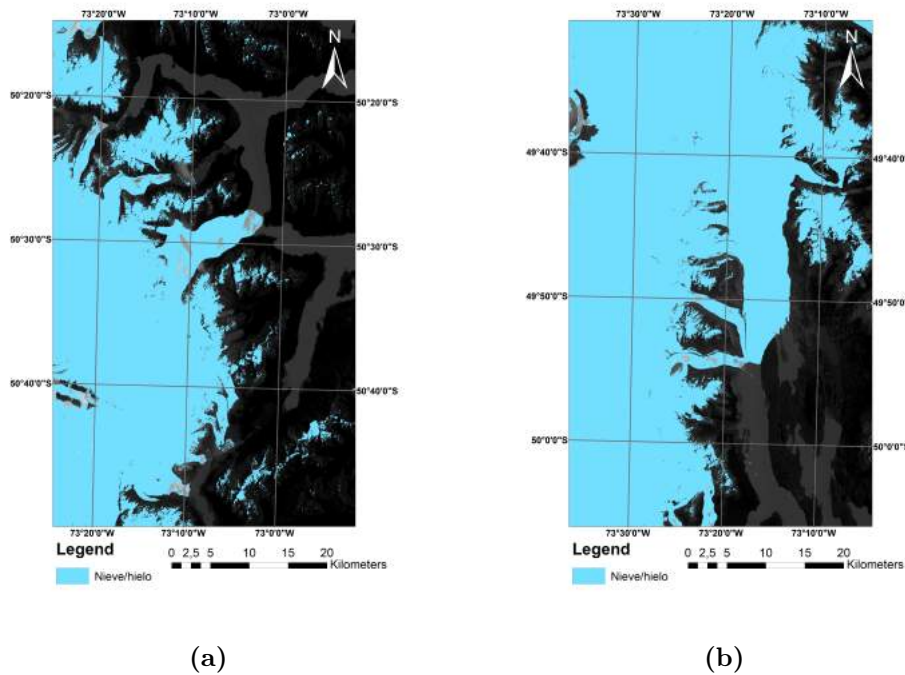


Figura 3.5.5: Máscara de zonas con nieve hielo en color celeste, realizada con la substracción de los índices NDSI y NDWI zoom de la zona de glaciar Perito Moreno (a) y glaciar Upsala (b)

Mediante este procedimiento, se generó shapefile para cada uno de los años de estudio en los que se pudo obtener una imagen satelital de la zona. Para poder diferenciar tanto el GPM como el G. Upsala del resto de las zonas con presencia de nieve, se intersecaron los polígonos obtenidos a partir de los modelos de elevación digital con cada uno de los polígonos generados a partir de la combinación de los índices espectrales.

3.5.1. Detección de debris

Para detectar zonas de debris o hielo cubierto, difíciles de discernir mediante un análisis visual o utilizando índices espectrales, fue necesario calcular la temperatura superficial aproximada de la zona. Esto fue posible únicamente para los datos de Landsat 8, que cuenta con una banda termal para dicho cálculo.

El cálculo se realiza mediante la reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA) en la banda 10. La obtención de esta información es posible de la misma manera que se explicó en la sección de preprocesamiento de la parte de metodología. Para obtener

la temperatura, son necesarias las constantes de conversión, que se obtienen de la metadata de la imagen satelital. Para la banda 10 de Landsat 8, existen dos constantes, 774.8853 y 1321.0789 (K_1 y K_2). El cálculo de la temperatura requiere la fórmula 3.5.2, donde BT significa “brightness temperature”:

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L}\right) + 1} - 273,15 \quad (3.5.1)$$

Aplicando esto a cada píxel de la imagen, se obtiene el mapa de temperaturas aproximadas. Por ejemplo, la figura 3.5.6 muestra el mapa con colores continuos (a), con variaciones que van desde los -13.4°C hasta los $\approx 30^{\circ}\text{C}$.

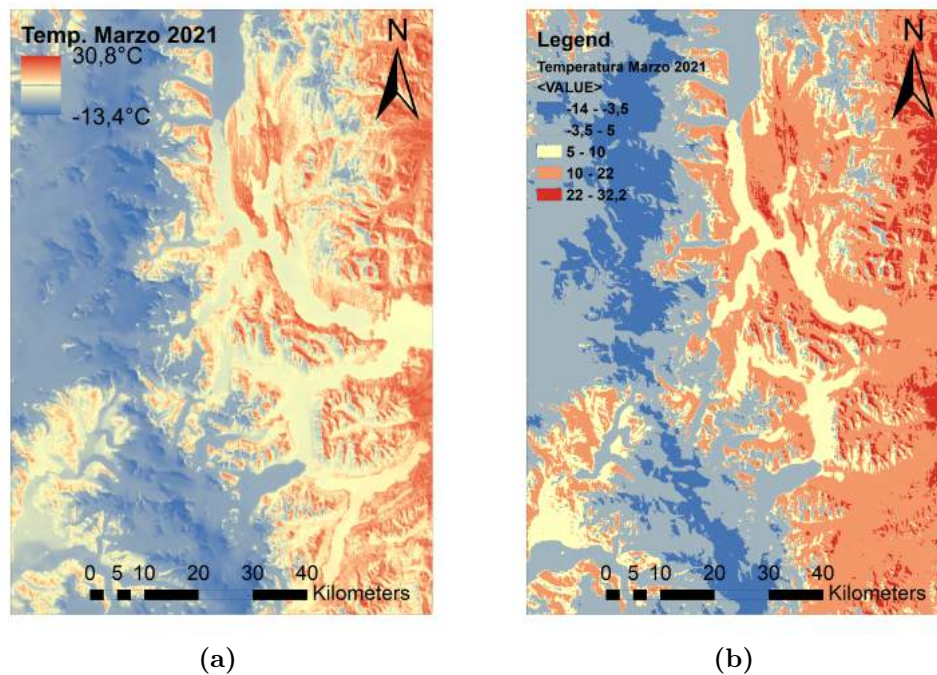


Figura 3.5.6: Mapas de temperatura para zona de estudio, obtenidos mediante bandas termal de datos Landsat 8, mapa con escala continua (a) y discretizados (b) ambos con sus respectivas escalas de colores en la esquina inferior izquierda .

Para derivar las zonas de presencia de debris, es necesario distribuir las temperaturas en valores discretos, viendo zonas con umbrales de temperatura. Por esto, se realizó una discretización de las temperaturas 3.5.6(b) en el mapa. Usando los mapas de temperatura de superficie generados por Landsat y su banda termal, es posible encontrar hielo glaciar cubierto por debris o escombros, según Taschner y Ranzi (2002). En su metodología, se menciona que zonas con temperaturas de

entre 0 a 10°C podrían ser hielo glaciar cubierto. Con esta información, se procedió manualmente a evaluar, con imágenes visuales en color real y falso color, además de la información extra proporcionada por esta metodología, para distinguir zonas con posible presencia de debris que corresponden a glaciares. Este proceso fue necesario dado que los índices espectrales no podían detectar estas zonas, ya que no poseen las mismas características espectrales que hielo o nieve descubierta. Para poder derivar las zonas donde haya presencia de debris es necesario distribuir las temperaturas en valores discretos viendo zonas con umbrales de temperatura para esto, se realizó una discretización de las temperaturas 3.5.6(b) vistas en el mapa. Utilizando mapas de temperatura de superficie generados a partir de Landsat y su banda termal es posible encontrar hielo glaciar cubierto por debris o escombros [Taschner and Ranzi \(2002\)](#), en donde en su metodología se menciona que zonas de entre 0 a 10°C existe la posibilidad que la zona sea hielo glaciar cubierto 3.5.7. Con esto en consideración se procedió de manera manual, a evaluar tanto con imágenes visuales en color real y falso color, además de la información extra que entregaba esta metodología a distinguir zonas con posible presencia de debris que efectivamente corresponden a glaciares y por la problemática entregada con la detección mediante índices espectrales no era posible detectarlos con estos, ya que evidentemente no poseen las mismas características espectrales que hielo o nieve descubierta. Se ha marcado con un cuadrado rojo la zona con posible presencia de debris en color marfil. Como se puede ver en la figura 3.5.7, las zonas cubiertas de escombros (dentro del rectángulo rojo) no son detectadas específicamente por falso color o índices, por lo que es necesario utilizar esta metodología para no perder información importante de los glaciares. Tal como se muestra en fig. 3.5.7 se puede ver como zonas cubiertas de escombros (rectángulo rojo) no son detectadas específicamente por falso color o índices directamente por lo que es necesario utilizar esta metodología para así no perder información importante de los glaciares.

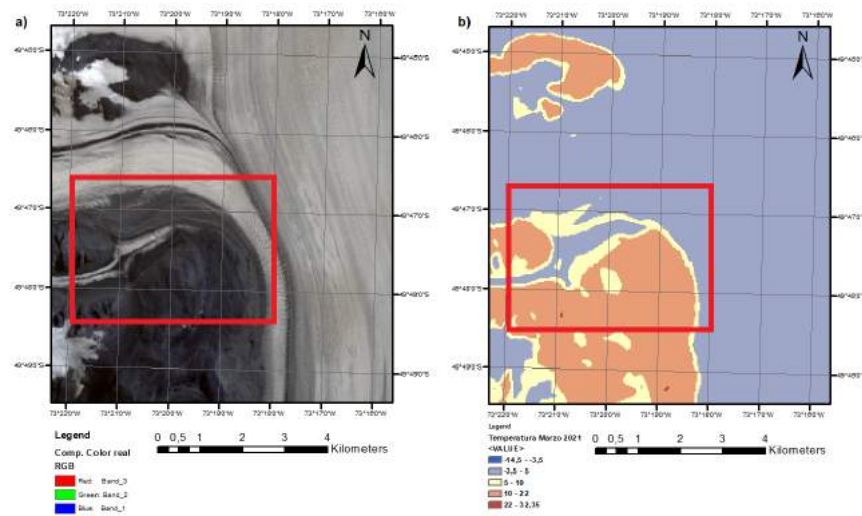


Figura 3.5.7: Mapas de temperatura discreta (derecha) y combinación de bandas en color real (izquierda).

3.5.2. Falso color

En el caso de este trabajo con Landsat, se han utilizado las combinaciones Azul, SWIR1 (Infrarrojo cercano de onda corta 1) y SWIR2, como se puede observar en la figura 3.5.8. Estos rangos son asignados respectivamente a Rojo, Verde y Azul. Esta combinación se usa para poder distinguir, de cierta forma, las nubes de las zonas de nieve.

Por otra parte, para diferenciar el suelo desnudo de las zonas cubiertas por nieve o hielo, se utiliza la combinación de Infrarrojo cercano (NIR), Rojo y Verde (RGB) (Fernandez and Herrero, 2001).

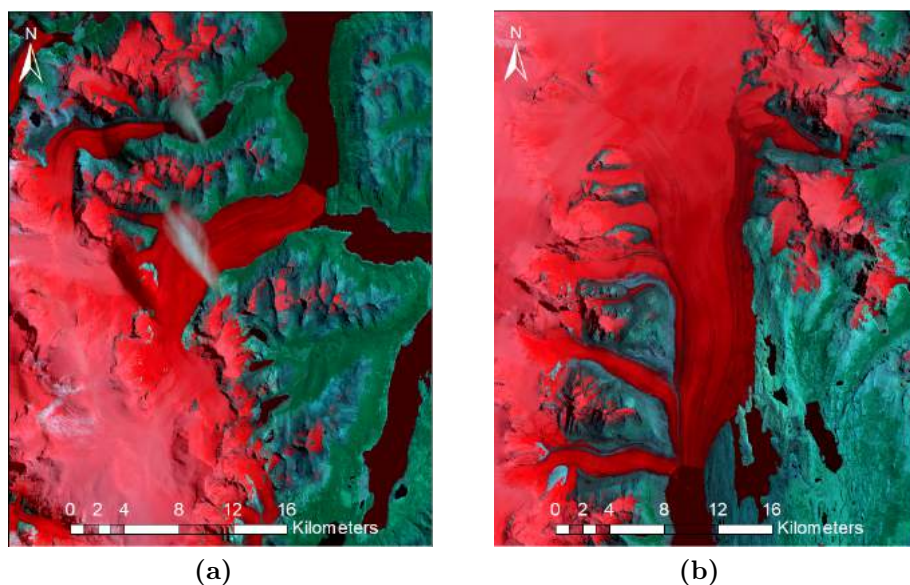


Figura 3.5.8: Falso color con combinación de azul, SWIR1 y SWIR2 en orden RGB para glaciar Perito Moreno (a) y glaciar Upsala (b).

Finalmente, en ciertos casos es posible establecer diferenciación entre zonas de nieve y hielo esto mediante la combinación de bandas Verde, NIR y SWIR (RGB) Fig. 3.5.9 debido a la diferencia en la reflectancia en el rango de longitud de onda azul entre estos (Rabatel et al., 2017).

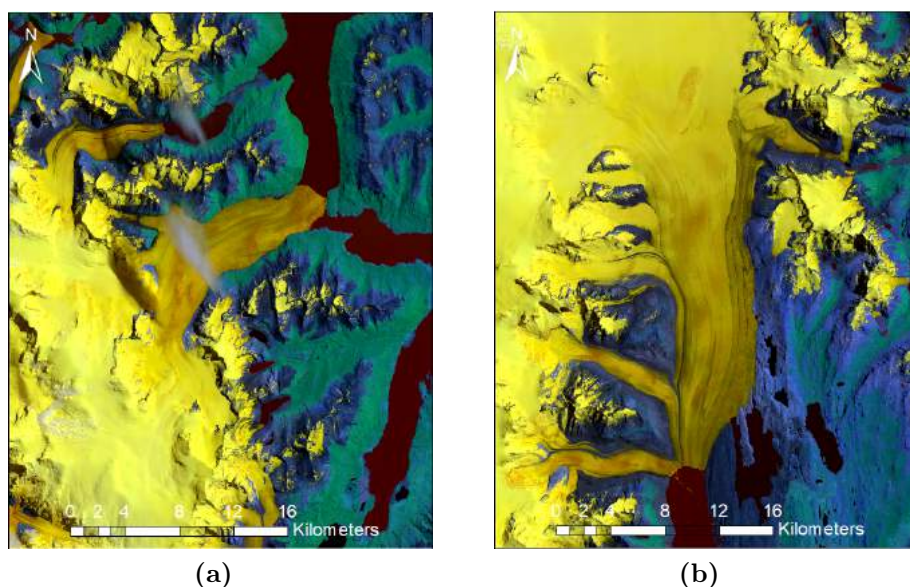


Figura 3.5.9: Falso color con combinación de NIR, Rojo y Verde en orden RGB para glaciar Perito Moreno (a) y glaciar Upsala (b).

Mediante la detección de debris y los dos compuestos de falso color anteriormente mencionados fueron corregidos los shapefile de manera manual. Eliminando ciertas inconsistencias que puedan presentar en alguno de los procedimientos anteriores.

3.5.3. Cálculo de volumen

Se calculó la variación de volumen del glaciar mediante los modelos de elevación digital (DEM). Primero, se realizó un cálculo de volumen del polígono del glaciar. Sin embargo, este volumen se consideró un “volumen virtual”. Es decir, no representa propiamente el volumen del glaciar, sino que incluye también el sedimento o roca que se encuentra bajo este. Esto se debe a que, solo con el modelo de elevación digital, no es posible determinar dónde termina el glaciar y dónde comienza el lecho de roca glaciar.

$$\Delta V = V_t - V_{t+4} \quad (3.5.2)$$

Con ΔV variación de volumen entre años seleccionados y V_t volumen correspondiente al año de la imagen y V_{t+4} volumen posterior a 4 años. Dado que no existen DEMs para todo el periodo de estudio, se extrajo la mayor cantidad de información válida para el análisis. Con esto en mente, se calcularon las diferencias de volumen en intervalos de 4 años para los periodos 2005-2009, 2009-2013, 2013-2017 y 2017-2021. Además, fue posible observar la variación anual de volumen para los periodos de 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016 y 2016-2017. Todo esto se realizó para el glaciar Upsala.

Para el caso del GPM, se decidió hacer una transformación directa de superficie a volumen (con el ASTER GDEM), sin tomar en cuenta variaciones temporales del glaciar. Esto se debe a que la disponibilidad de datos para este glaciar es aún más limitada que para el glaciar Upsala.

3.5.3.1. Detección de nubes

La presencia de nubes en algunos datos DEMs requería una detección y posterior eliminación para la imagen final, que se utilizó en el cálculo de volumen de cada año. Este procedimiento implicó una sustracción entre los DEMs correspondientes a cada año y los datos ASTER GDEM V3. Este último es el DEM global calculado con ASTER que no presenta variación temporal ni presencia de nubosidad.

Posterior a este cálculo, se aplicó un umbral al ráster obtenido para identificar zonas con una diferencia de altura mayor a 100 metros. Estas se consideraron como zonas con nubes. Se generó una máscara con valores 0 y 1, designando el 1 a zonas con nubosidad. Este proceso resultó en un shapefile que se realizó para cada año de datos DEMs obtenidos.

Los shapefiles obtenidos se fusionaron. En las zonas que presentaron nubes en algún periodo, estos datos se extrajeron y se consideraron como NaN para todas las fechas. El resultado fue una imagen del DEM con las nubes eliminadas, como se puede observar en la figura 3.5.10. En la zona en rojo se pueden apreciar áreas sin datos en la zona de ablación del glaciar Upsala. Estas secciones se extrajeron y se reemplazaron por NaN.



Figura 3.5.10: Muestra la extracción final de nubes para la zona del glaciar Upsala en 2005, que se utilizará para el cálculo de volumen. A la izquierda, se muestra un acercamiento a la zona de ablación del glaciar, específicamente el área en el rectángulo rosa. El rectángulo con bordes rojos indica la zona donde se extrajeron las nubes y se reemplazaron por valores sin datos (NaN).

Posteriormente, debido a problemas en el cálculo del volumen por la presencia residual de nubes en el DEM, se seleccionaron zonas representativas. Estas zonas se encuentran dentro de la delimitación realizada mediante índices espectrales y falso color del glaciar para el mismo año en que se obtuvo el modelo de elevación digital, como es el caso de la figura 3.5.10 para el año 2005. Adicionalmente, estas

zonas no presentan nubes en ningún periodo anterior o posterior. Estas zonas se presentan en color burdeos en la figura 3.5.11.

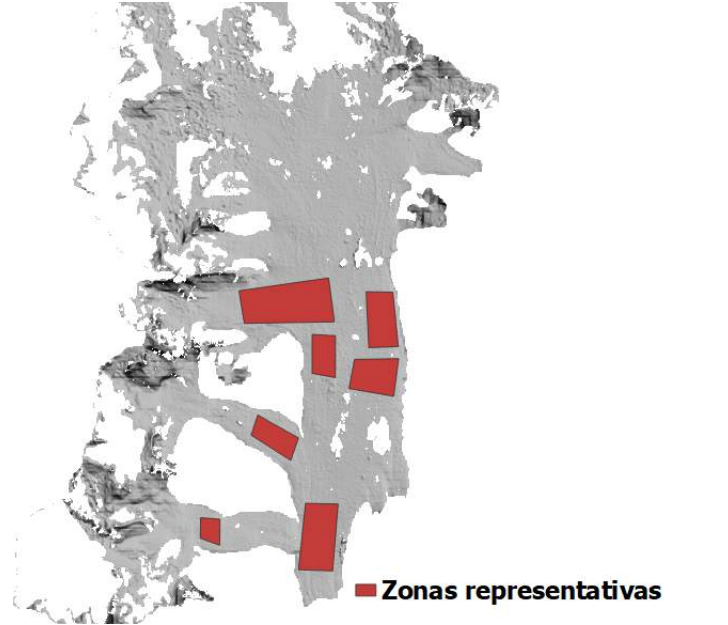


Figura 3.5.11: DEM del glaciar Upsala para el año 2005, con las llamadas zonas representativas seleccionadas en polígonos de color burdeo, estos son seleccionados dentro de la zona de ablación de cada uno de los glaciares, es decir glaciar Upsala, Bertachi, Murallón y Cono.

Los polígonos resultantes se ubicaron todos dentro de la zona de ablación del glaciar Upsala y de los demás glaciares presentes dentro del complejo de este glaciar. Luego, se calculó la superficie del conjunto de polígonos seleccionados para obtener el volumen con el mismo DEM. Posteriormente, se realizó la resta de cada uno de los periodos (cada 4 años para un caso y anualmente para otro).

3.5.4. Variación de volumen a variación de masa

Podemos obtener el equivalente de agua en Gigatoneladas para los datos de volumen obtenidos con la metodología anterior, mediante la siguiente ecuación.

$$\Delta M_{hielo} = \Delta V_{agua} / \rho_{hielo} \quad (3.5.3)$$

Considerando V_{agua} volumen del agua, ΔM_{hielo} variación de masa de hielo y ρ_{hielo} densidad del hielo (0.9167 Gt/km^3).

Enseguida, según lo propuesto por Cogley et al. (2011), Vaughan et al. (2013),

Huss and Hock (2015), es posible calcular el equivalente en nivel del lago (aporte a la altura del lago) con la masa total perdida por el glaciar. Esto es obtenido considerando parte de la ablación frontal a partir de la pérdida de masa del glaciar, empezando por la ecuación siguiente.

$$Volumen_{1mm} = A \times H_{1mm} \quad (3.5.4)$$

Aquí, el Volumen se refiere al volumen necesario para aumentar la nivel del lago en 1 mm (10^6 km). A es el área promedio del lago Argentino y del Brazo Rico, que se aproximan a ≈ 1466 km² y ≈ 150 km² respectivamente (Chinni and Warren, 2004). Estas aproximaciones son coherentes con lo obtenido mediante imágenes de Landsat 8 mediante el NDWI durante este estudio.

Con estos datos, se calculó que para el caso del lago Argentino, el valor es de 1.466×10^{-3} km³ y para el Brazo Rico, de 0.15×10^{-3} km³ para aumentar su altura en 1 mm. Estos valores deben ser reemplazados en la ecuación 3.5.5

$$\Delta LLE = \Delta M \frac{1}{vol_{1mm}} \quad (3.5.5)$$

LLE se refiere al “lake level equivalent”, ΔM a la variación de masa, y vol_{1mm} el resultado obtenido en la ecuación 3.5.4. El resultado de esta ecuación corresponderá al aporte neto del glaciar al lago Argentino (Brazo rico) en metros.

Para calcular el caso del glaciar Perito Moreno, es necesario conocer el aporte que este tendrá a cada uno de sus terminantes. Para ello, consideramos que un 32 % del derretimiento del GPM irá al Brazo Rico, mientras que el restante 68 % irá hacia el lago Argentino (Stuefer et al., 2007).

3.6. Datos climáticos

3.6.1. Validación datos ERA5

Para realizar una comparación entre los datos obtenidos a partir de las imágenes satelitales (superficie y pérdida de volumen glaciar), se utilizaron datos de reanálisis de ERA5 de temperatura mensual. Estos datos fueron validados mediante la estación meteorológica presente en la zona de El Calafate (50.26°S, 72.05°O) y Lago Argentino (50.33°S, 72.3°O) **Fig. 3.6.1**. Se realizó un scatterplot o diagrama de dispersión para apreciar gráficamente la relación entre las dos

bases de datos. En este caso, se compararon las variables medidas “in-situ” por la estación con lo generado por el reanálisis correspondiente en el mismo punto. Además, se trazó una regresión lineal entre estas dos variables (mediciones y ERA5).’

Tal como se puede ver en la Figura 3.6.1, se presenta un buen ajuste para la zona donde se encuentra la estación meteorológica, con una correlación cercana al 98 % con los datos de ERA5. El error al calcular el RMSE es de 2.4°C, sin embargo, al comparar ambas series a lo largo del tiempo, se puede ver cómo los peaks de temperatura máxima en las mediciones de la estación meteorológica son subestimados por el modelo de ERA5, mientras que los mínimos son sobreestimados. Por esta razón, se aplicó una constante de corrección a la serie de ERA5, con el fin de ajustar tanto la media como la desviación estándar. Para la media, fue necesario sumar una constante de 1.3294, y para la desviación estándar, se multiplicó la serie por una constante de 1.11911. De esta manera, tanto la desviación estándar como la media lograron una mayor igualdad al compararlas con la serie de datos in situ

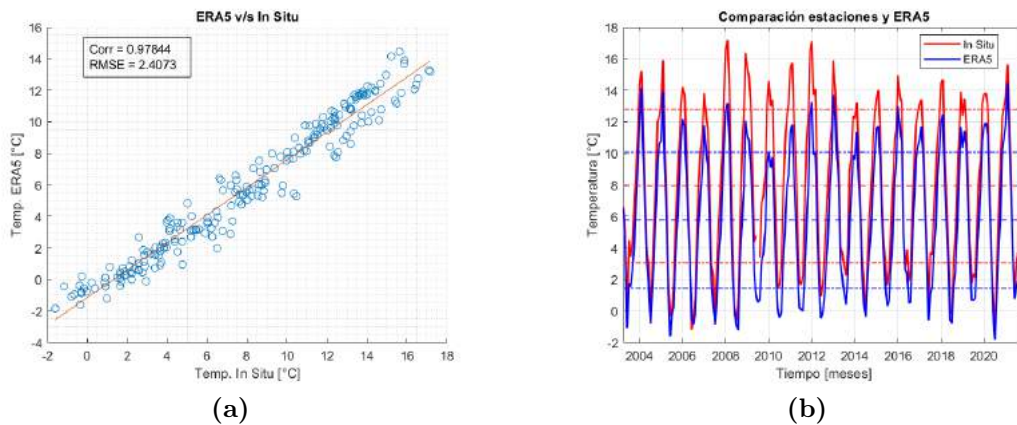


Figura 3.6.1: Scatterplot de temperatura observada por la estación meteorológica en el eje x y temperatura obtenida en el mismo punto con ERA5 (a), con su respectiva recta ajustada en rojo. Comparación entre la serie generada a lo largo del tiempo en para la estación(rojo) y con los datos de ERA5 (azul). Se presenta en líneas solidas la media de cada serie con su color respectivo y en líneas discontinuas las desviaciones estándar de las series.

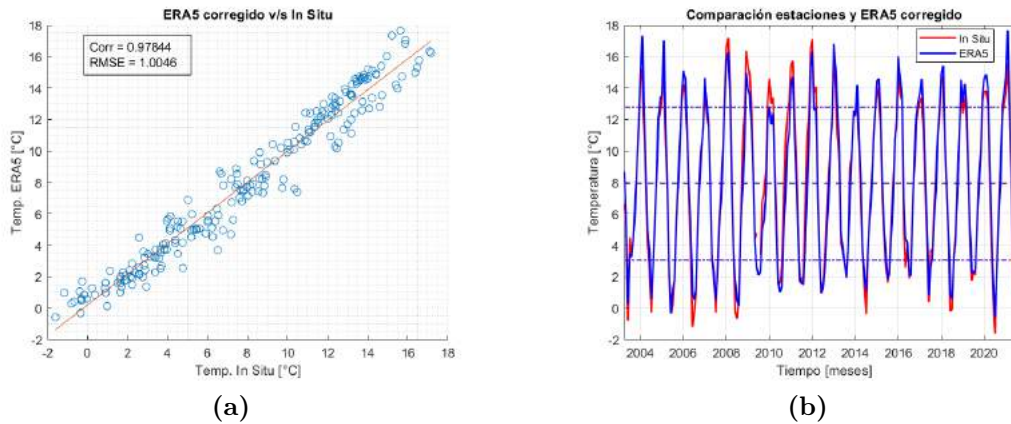


Figura 3.6.2: Scatterplot de temperatura observada por la estación meteorológica en el eje x y temperatura obtenida en el mismo punto con ERA5 ya aplicada ambas constantes de corrección(a), con su respectiva recta ajustada en rojo. Comparación entre la serie generada a lo largo del tiempo en para la estación(rojo) y con los datos de ERA5 corregidos (azul). Se presenta en líneas solidas la media de cada serie con su color respectivo y en líneas discontinuas las desviaciones estándar de las series.

La figura 3.6.2 muestra que, después de aplicar estas correcciones, los máximos y mínimos son sub o sobreestimados respectivamente, aunque no tan notablemente como antes. La serie de ERA5 muestra ahora una mayor similitud con la de la estación meteorológica. Además, el RMSE muestra una disminución del error por encima de los 1.2°C , desde aproximadamente los 2.4°C de error hasta los 1.2°C . Se presenta una buena correlación y un error no considerablemente alto. Este proceso también se aplicó para datos de ERA5-Land, pero se decidió utilizar solo los datos de ERA5 debido a una menor correlación entre ERA5-Land y la estación (≈ 0.96), y un mayor RMSE entre ellos, por encima de los 3.1°C .

3.6.2. Coeficiente de correlación de Pearson (r) y error cuadrático medio (RMSE)

Además del scatterplot, fue necesario calcular tanto el coeficiente de correlación de Pearson como el RMSE. El primero cuantifica la relación lineal entre dos variables, en primera instancia para relacionar in situ vs reanálisis, con el objetivo de validar los datos. Luego, al comparar series de superficie del glaciar con los mismos datos climáticos, la correlación se obtuvo con la covarianza y varianza entre las dos variables que se querían comparar, calculándose con la ecuación 3.6.1 y tomando

en cuenta valores entre -1 y 1.

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \quad (3.6.1)$$

Por otro lado, se calculó la raíz del error cuadrático medio (RMSE), que muestra las diferencias entre los resultados de un modelo predictivo y los llamados valores de muestra o, en este caso, los valores in situ. Los valores deben ser solo positivos y, al ser más cercanos a 0, expresarán un mejor desempeño del modelo utilizado con respecto a los valores de muestra. El RMSE se calculó mediante la ecuación 3.6.2, donde x_i son los valores de muestra o valores in situ en nuestro caso, y $\hat{x}_i$ son los valores del modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}} \quad (3.6.2)$$

Con x_i los valores de muestra o valores in-situ en nuestro caso y $\hat{x}_i$ valores del modelo.

Es importante destacar que, si bien las correlaciones nos permiten identificar asociaciones entre variables, no establecen una relación causal directa entre ellas. En otras palabras, una correlación no implica que un cambio en una variable cause necesariamente un cambio en la otra. Sin embargo, es un buen primer acercamiento para conocer de qué forma se podría comportar el glaciar al comparar con diferentes variables meteorológicas. Tal como se presentará en este trabajo.

3.7. Diagrama Metodología

A continuación, a modo de resumen se presenta la metodología utilizada en el diagrama de flujo presentado a continuación (**Fig.3.7.1**).

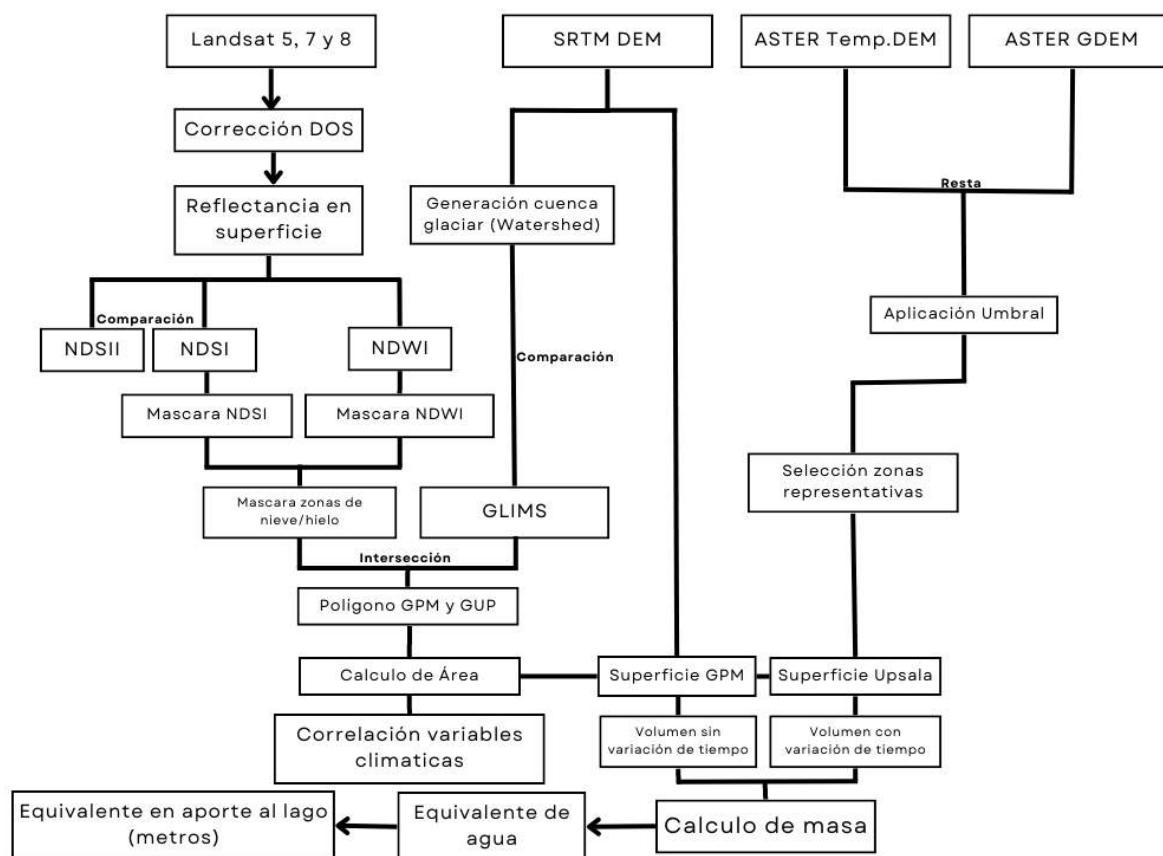


Figura 3.7.1: Diagrama de flujo de la metodología utilizada para el estudio presentado anteriormente, empezando con cada una de las bases de datos utilizadas, en un principio Landsat 5,7 y 8, ASTER_DEM y SRTM_DEM.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Delimitación glaciares

Mediante la metodología explicada en la sección anterior fue posible obtener cada una de las zonas con presencia glaciaria tanto para el glaciar Perito Moreno como para el glaciar Upsala. Dando como ejemplo las siguientes delimitaciones para ambos glaciares, en este caso las imágenes corresponden a noviembre del 2019 (**Fig.4.1.1**).

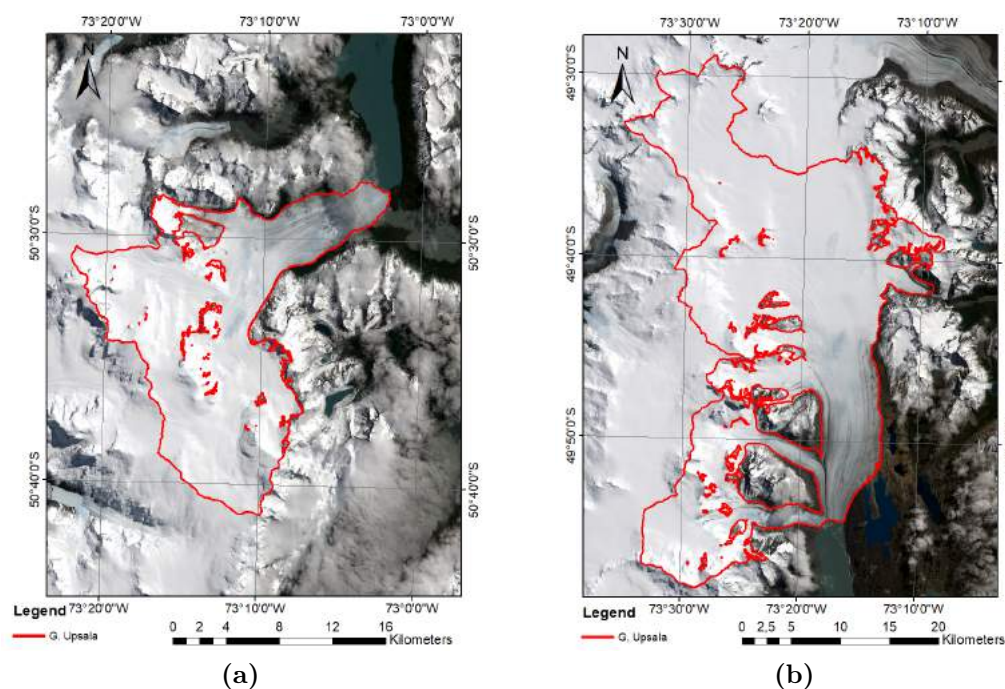


Figura 4.1.1: Delimitación final para glaciar Perito Moreno (a) y glaciar Upsala (b), para noviembre del año 2019

La metodología para obtener los límites de los glaciares fue aplicada cada una de las imágenes Landsat utilizadas considerando cada uno de los años de la zona de estudio (entre 1997 a 2021), obteniendo un shapefile para cada año, siendo posible ver los cambios de superficie a lo largo del periodo de estudio.

4.1.1. Glaciar Upsala

Teniendo en consideración esto se presenta la variación a lo largo del periodo de estudio para el glaciar Upsala en la figura 4.1.2. En este se pueden ver los cambios que ha sufrido este cuerpo de hielo desde el año 1998 hasta el 2021.

Los colores presentados que van desde el blanco para 1997 siendo la primera fecha de estudio, hasta los colores más cálidos (tonos rojos) hasta llegar al negro para la última fecha de estudio (2021).

En la figura 4.1.2, se aprecia un significativo retroceso del glaciar Upsala a lo largo del tiempo. Este retroceso es especialmente notorio en su parte frontal terminante del glaciar, conocida como el brazo Upsala (**Fig.4.1.3**).

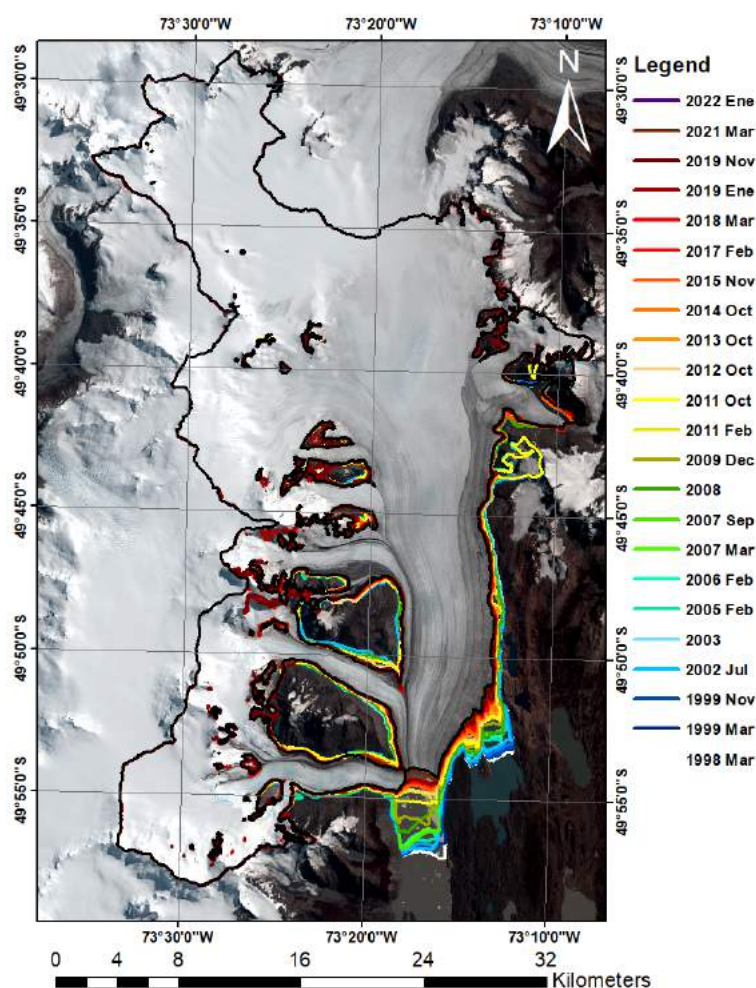


Figura 4.1.2: Delimitaciones de cada año del glaciar Upsala. Con el blanco indicando el año inicial del estudio (1997) pasando de tonos fríos (azul, celeste, verde). A tonos cálidos (amarillos, rojizos) para años más actuales, hasta el negro representando los años más recientes (2021).

Además, se observa un mayor retroceso, en la sección terminante, al sureste del glaciar, en la zona conocida como el lago Guillermo. Esto ha resultado en una significativa acumulación de agua en esa zona como se puede apreciar en la figura 4.1.3.

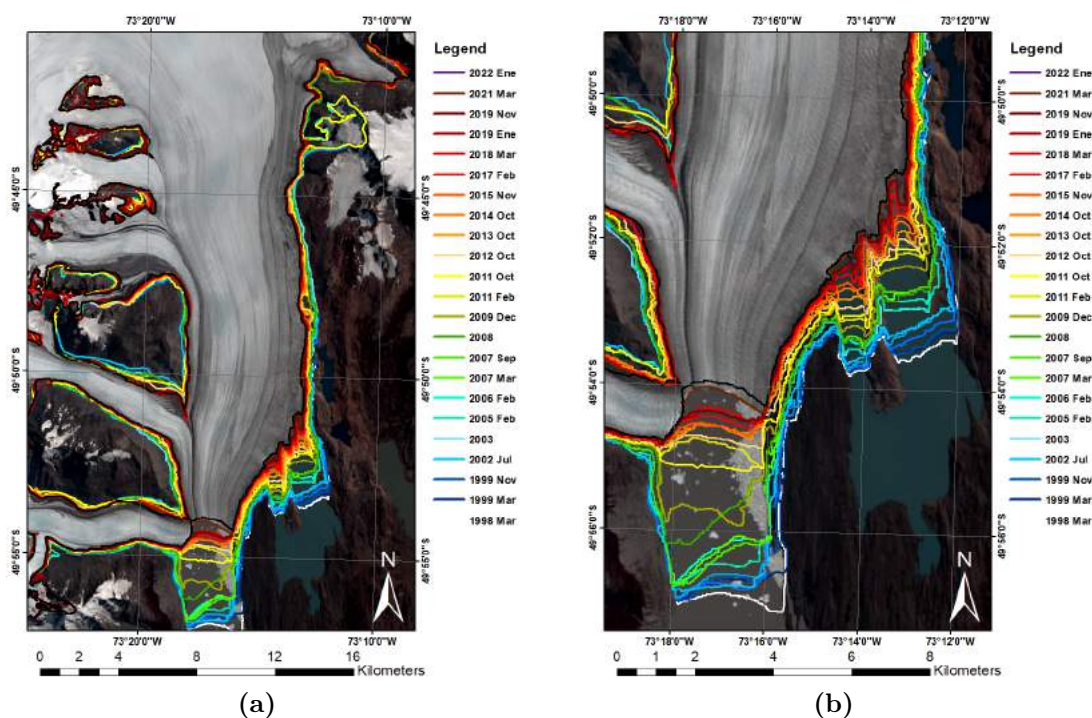


Figura 4.1.3: Frente del glaciar Upsala a lo largo del tiempo, para la zona terminante en brazo Upsala (a), retroceso de este con énfasis en zona terminante en lago Guillermo (b).

Mirando más en detalle, es notorio que la parte este de la lengua glaciar, o zona de ablación, muestra un adelgazamiento progresivo a lo largo del tiempo, particularmente notorio durante el último periodo del estudio (**Fig.4.1.4**). Además, podemos observar que los bordes de la zona de ablación del glaciar Bertacchi y Cono, muestran pérdida de masa glaciar tanto en su parte sur y norte, siendo esta última más notoria, sobre todo en el caso del glaciar Cono. De igual manera, el glaciar Murallón también experimenta pérdidas bastante evidentes, aún más pronunciadas, que los dos casos anteriores. Esto ha dejado al descubierto múltiples zonas de rocas que anteriormente no se encontraban presentes dentro de las delimitaciones. Estas pérdidas de masa probablemente se deben a la pequeña zona de acumulación que poseen los dos glaciares. Esto contrasta con la gran zona de acumulación del glaciar Upsala. Además, comparando ambos (Cono y Murallón) con el glaciar Bertacchi, se observa que, aunque este último también presenta pérdidas importantes en distintas zonas, estas no son tan pronunciadas como las de otros glaciares pertenecientes al complejo Upsala.

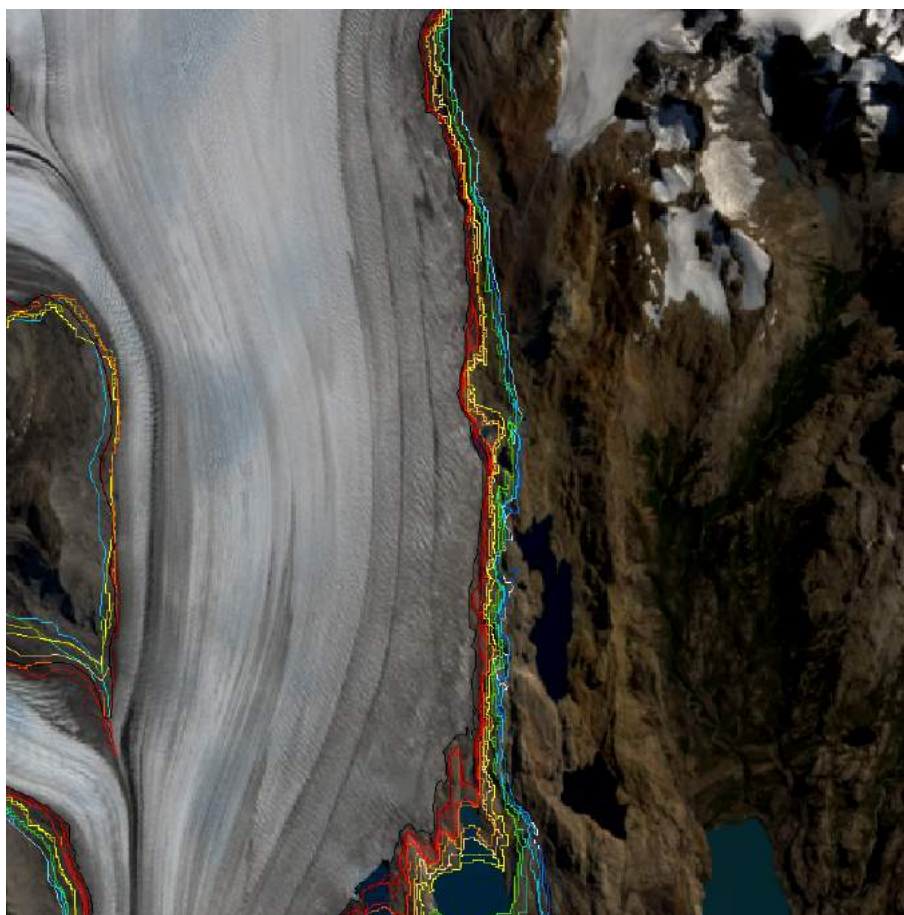


Figura 4.1.4: Zona este de la lengua glaciar en donde se puede apreciar un adelgazamiento progresivo, siendo aun mayor posterior al año 2011, colores amarillos hacia colores en tonos rojos.

En el caso de la parte oeste del glaciar, los mayores cambios que se pueden observar son en la sección norte del glaciar Cono, además de la pérdida total de la zona presente al sur del glaciar Murallón (**Fig. 4.1.5**).

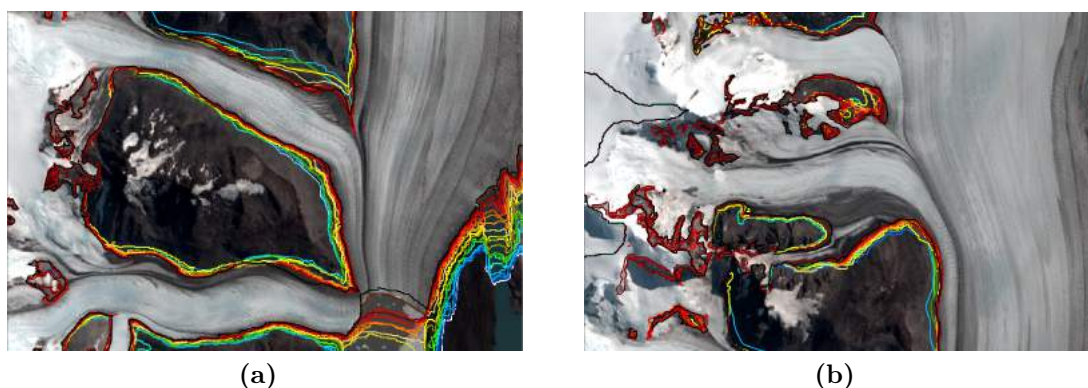


Figura 4.1.5: Glaciar Cono (norte) y glaciar Bertacchi (sur) con su respectiva variación en colores (fríos y cálidos) a lo largo del tiempo (a) y zona de glaciar Murallón con un claro adelgazamiento en la zona sur(b).

Finalmente podemos observar cómo, posterior al año 2011, hubo una separación de una sección de hielo con la parte principal de la zona de ablación del glaciar Upsala en su lado este (**Fig.4.1.6**). Anteriormente, esta última se encontraba conectada a la lengua glaciaria; posteriormente esta conexión no fue considerada en las delimitaciones generadas para los siguientes años.

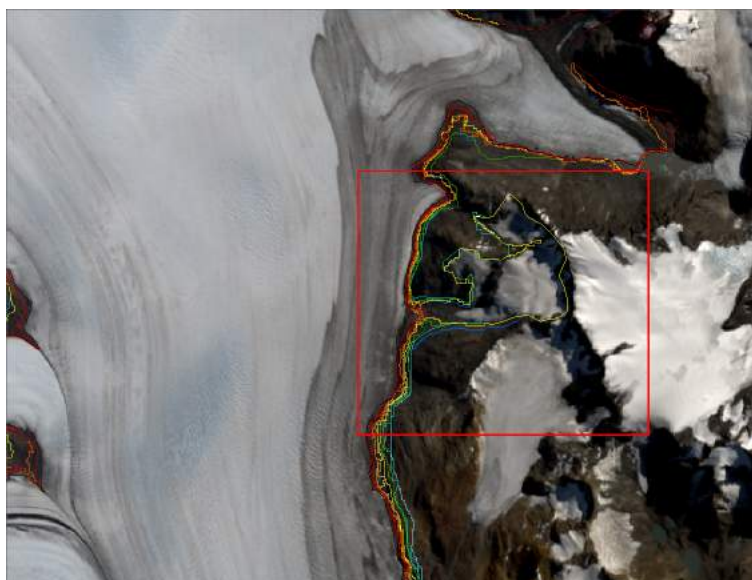


Figura 4.1.6: Sección perdida por el glaciar Upsala posterior al año 2011 demarcada en un rectángulo rojo, posterior al año 2011 no fue considerada dentro de la delimitación.

4.1.2. Glaciar Perito Moreno

Observemos la figura (**Fig.4.1.7**). A diferencia del glaciar Upsala, el Glaciar Perito Moreno, no muestra una clara tendencia al retroceso. En cambio, parece haber una oscilación entre el avance y retroceso, sobre todo en su parte frontal (**Fig.4.1.7**). Este fenómeno se atribuye a la formación intermitente de un dique de hielo que se forma y luego se rompe, permitiendo el transporte de agua desde la zona del Brazo Rico hacia los brazos del lago Argentino ([Chinni and Warren, 2004](#)). A pesar de la oscilación en el frente glaciar del GPM, es posible notar una pérdida importante de masa en la zona noreste de la lengua del GPM entre los años 2016 y 2020. Este notorio adelgazamiento, da claras señales de retroceso sostenido durante el último periodo de estudio.

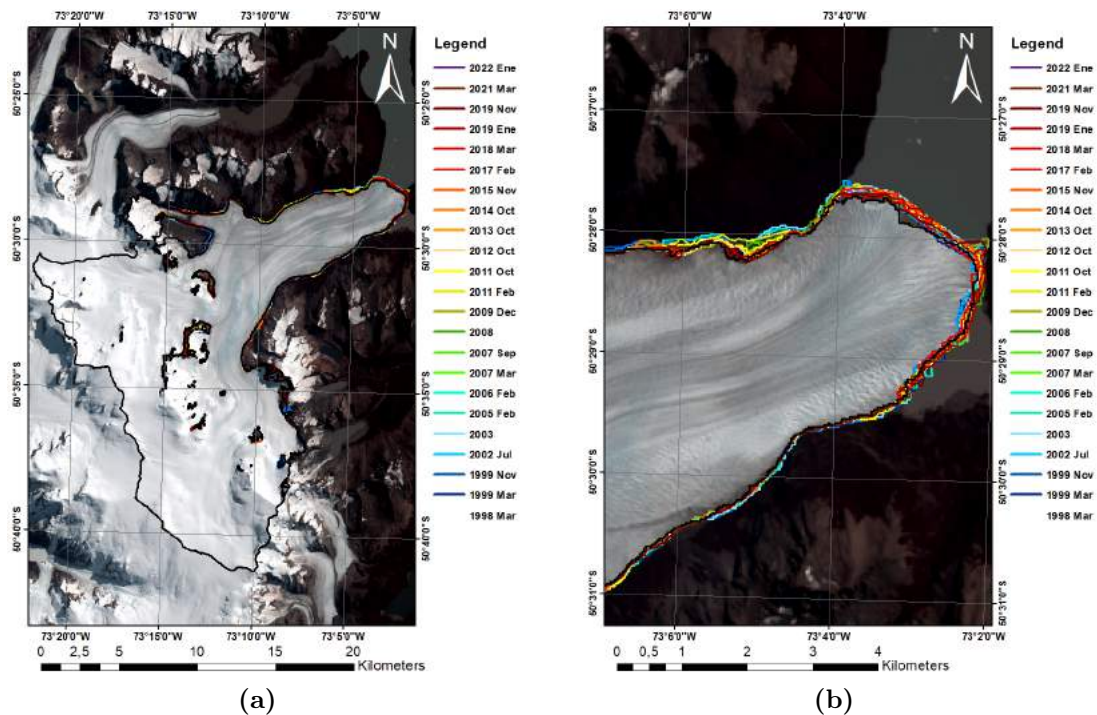


Figura 4.1.7: Delimitaciones de cada año del glaciar Perito Moreno. Con el blanco indicando el año inicial del estudio (1997) pasando de tonos fríos (azul, celeste, verde). A tonos cálidos (amarillos, rojizos) para años más actuales, hasta el negro representando los años más recientes (2021).

Cabe recalcar que, de igual manera que en su zona frontal, es posible ver un retroceso durante los últimos años. Esto es evidente en la figura 4.1.7 (b). Además, la zona norte del brazo del GPM, ha experimentado un adelgazamiento. Pese

a no ser de gran magnitud como en 4.1.7 (b), es notable. Pequeñas masas de agua han comenzado a aparecer en los bordes de esta zona. Este fenómeno se pudo detectar utilizando el índice NDWI, que es útil para detectar masas de agua que no son fácilmente visibles al evaluar con colores reales. Estos cambios son apreciables durante el último tiempo (2019-2020). Es importante destacar que no se registraron cambios similares a este durante el resto del periodo de estudio (Fig. 4.1.8).

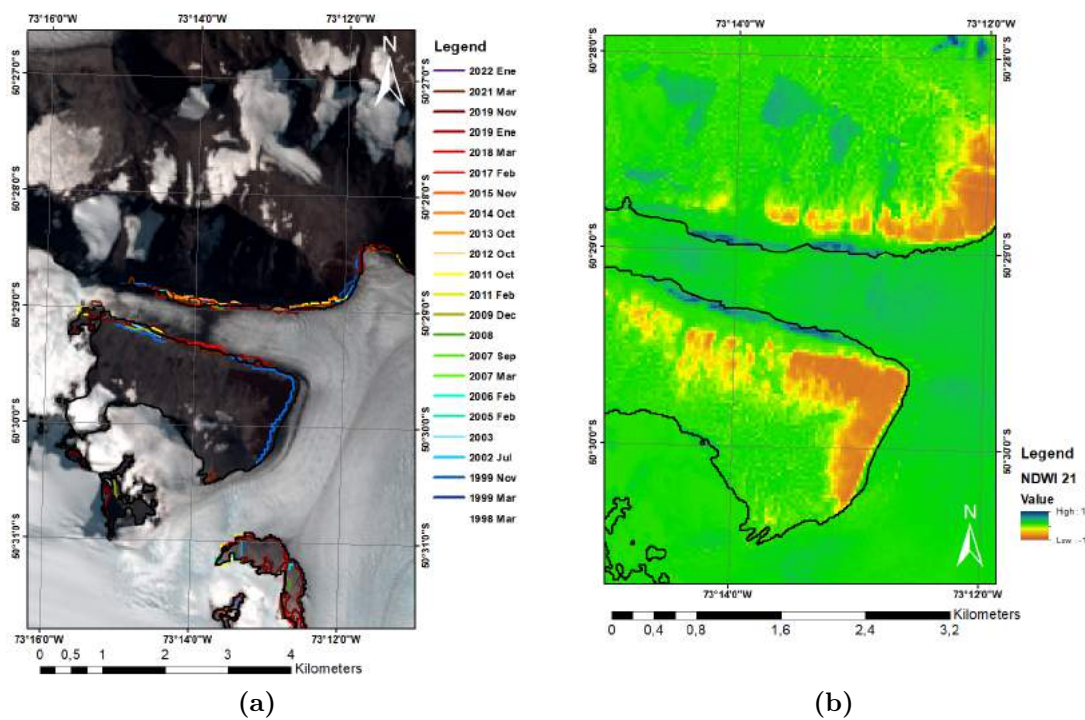


Figura 4.1.8: Brazo Perito Moreno con sus respectivas delimitaciones (a). Normalized Difference Water Index de la misma zona para el año 2021 (b), con pequeñas masas de agua presentándose en esta zona (zonas en azul) tanto en las zonas norte y sur del brazo. Este fenómeno de generación de masas de agua no se había apreciado anteriormente.

4.2. Cálculo de área glaciar

Con a los polígonos generados, gracias a las propiedades vectoriales que estos tienen es posible obtener la superficie de cada uno de estos y así observar la variación que han tenido tanto el glaciar Upsala como el GPM a lo largo del periodo de estudio. Al obtener la superficie de cada polígono en diferentes momentos del tiempo, se puede comparar la extensión de los glaciares en distintos años. Esto permitirá

evaluar cómo han variado en tamaño y forma durante el periodo de estudio, lo que proporcionará información valiosa sobre su comportamiento. Además, al analizar las variaciones en la superficie de los glaciares Upsala y GPM, se podrán identificar patrones y tendencias que ayuden a comprender mejor la dinámica glacial en la región.

4.2.1. Glaciar Upsala

Al evaluar la figura 4.2.1, se puede apreciar cómo se condice con lo mencionado anteriormente. Es evidente la variación del glaciar Upsala, que presenta una pendiente negativa superior a -3. Esto indica una disminución progresiva de su superficie entre los años 1997 y 2021. El máximo se registró en el año 1997, a la fecha de inicio de este estudio con $\approx 829,70 \text{ km}^2$. El mínimo se registró en 2021 con $\approx 757,65 \text{ km}^2$.

Pese a lo anteriormente mencionado, la serie no presenta muchos cambios abruptos en las pérdidas de superficie, considerando su gran magnitud. En su gran mayoría, los cambios oscilan entre 2 a 5 km^2 de superficie. Sin embargo, lo sostenido de estas pérdidas, hace que la variación total del glaciar entre 1997 y 2021 es considerable. Supera los 73.5 km^2 de pérdida de superficie total durante este periodo de tiempo, lo que significa alrededor de un 9 % de su superficie total en 24 años de estudio. En la última década, se observa un cambio drástico de la pendiente a partir del año 2010. Aquello a diferencia de periodos previos, puesto que entre 1997 y 2009, las pérdidas, aunque progresivas, no fueron de gran magnitud. Sin embargo, a partir del año 2010 en adelante, estas pérdidas se acentúan de gran manera.

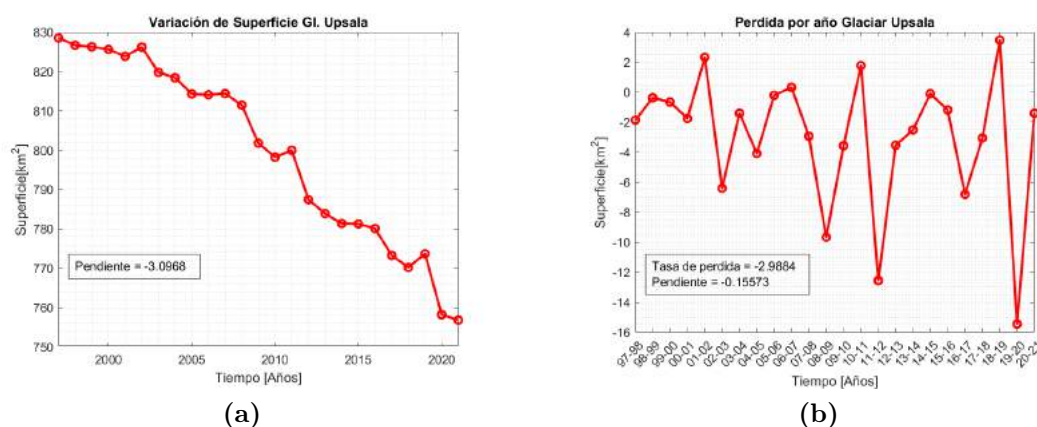


Figura 4.2.1: Cambios de la superficie total en km^2 del glaciar Upsala, entre 1997 y 2021(a) en el cuadrado de la esquina inferior izquierda el valor de la pendiente de la serie. Variaciones de superficie en km^2 entre años 1997 a 2021 (b), presentada en cuadrado de la esquina inferior izquierda pendiente de la serie y promedio de pérdida entre 1997 y 2021. En línea negra presentando el límite del valor 0 y ambos con su pendiente presentada en línea punteada roja.

Dentro de la pérdida progresiva de superficie también es posible ver distintos cambios más particulares. Uno de ellos, es la ganancia vista en el año 2002, uno de los pocos años con un aumento significativo. Este aumento se encuentra en el orden de entre $2\text{--}3 \text{ km}^2$, e incluso se puede observar un pequeño avance en su frente, en la imagen de color real (4.1.3 b).

Además, cabe destacar el cambio entre el año 2019-2020, donde la ganancia es superior a 3 km^2 . Este incremento contrasta con los cambios presentes entre los años 2005 a 2007. Durante este período, aunque hubo una ganancia, esta no superó el km^2 por año. Esto también es evidente entre los años 2010 y 2011, donde a pesar de los cambios visibles en los polígonos (incluso mayor que el del 2002) el cambio de la superficie total es finalmente solo cercano a 1 km^2 . Además, en los periodos 2014-15 o 2016-17, aunque hubo ganancias, estas no son significativas. Por otro lado, las pérdidas más importantes se pueden observar entre los años 2011 y 2012. Estos corresponden a la vista anteriormente del lado este del área de ablación del glaciar Upsala (Fig. 4.1.6), con una pérdida de superficie de más de 13 km^2 en un solo año. Cabe destacar también la pérdida vista entre los años 2020 y 2021, con una pérdida total de aproximadamente 16 km^2 de superficie entre estos años. Esta disminución se debe principalmente al retroceso del frente glaciar de la zona conectada al lago Argentino y la zona terminante en el lago Guillermo,

además del adelgazamiento progresivo de la zona de ablación glaciar.

4.2.2. Glaciar Perito Moreno

De igual manera que el glaciar Upsala, es posible ver como se pueden establecer relaciones entre su serie de tiempo generada a partir de los polígonos con lo mencionado anteriormente en el análisis visual del falso color.

Observamos una periodicidad de los cambios que ha sufrido el GPM a lo largo del tiempo de estudio. El comportamiento del GPM muestra un comportamiento de oscilación. Encontramos tanto perdidas como ganancias de masa, inclusive períodos sin cambios significativos de un año a otro. Por ejemplo, entre los años 2002 a 2003, permaneciendo alrededor de 256.2 km^2 . También entre 2006 y 2009, no existe una variación mayor a 0.1 km^2 .

Este comportamiento contrasta fuertemente con el del glaciar Upsala, el cual tiene una curva de pérdida de masa muy notoria. A pesar de tener pequeñas ganancias de superficie, tal como se menciona anteriormente, la tendencia general muestra una clara disminución a lo largo del tiempo.

Finalmente, cabe destacar que la pendiente de la curva de GPM es de -0.06 , una gran diferencia con la pendiente de -3 del GUP.

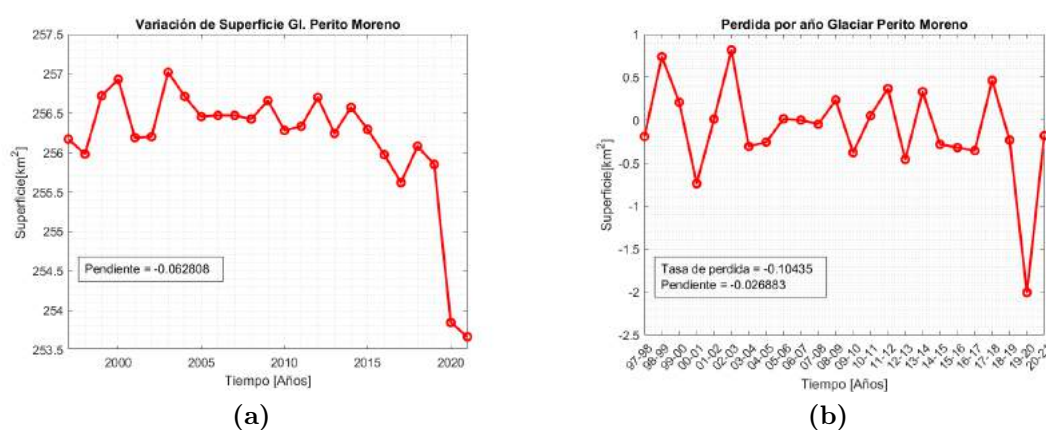


Figura 4.2.2: Cambios de la superficie total en km^2 del glaciar Perito Moreno, entre 1997 y 2021(a) en el cuadrado de la esquina inferior izquierda el valor de la pendiente de la serie. Variaciones de superficie en km^2 entre años 1997 a 2021 (b), presentada en cuadrado de la esquina inferior izquierda pendiente de la serie y promedio de pérdida entre 1997 y 2021. En línea negra presentando el límite del valor 0 y ambos con su pendiente presentada en línea punteada roja.

Es posible observar además que el glaciar Perito Moreno, a diferencia del

glaciar Upsala, no maneja cambios de superficie altos. Las fluctuaciones oscilan aproximadamente entre 0.2 a 0.8 de km^2 como máximo, a diferencia del glaciar Upsala el cual maneja cambios de entre 2 a 5 km^2 .

El GPM ha mostrado una disminución progresiva durante el último periodo, específicamente entre los años 2014 a 2021, con excepción del año 2016. Este descenso se ve reflejado en el análisis visual de los polígonos. Es posible ver como en su frente este ha retrocedido de gran manera. Esto ocurre sobre todo en su zona noreste, sector que esta anexado a la cuenca del glaciar. También es notable el adelgazamiento sostenido del brazo del glaciar, a lo largo de los últimos años. Esto genera pequeñas masas de agua alrededor al glaciar. Estas son posible de observar mediante NDWI ((**Fig. 4.1.8** (b))) en la zona sur y norte del brazo del glaciar Perito Moreno durante los años 2019-2021.

4.3. Variación de volumen y masa

A diferencia del cálculo de superficie glaciar para el caso del volumen no fue posible obtener un resultado para cada de año en el periodo de estudio. El cálculo del volumen glaciar resultó más complicado debido a la limitación de datos DEMs de ASTER con nubes. Por este motivo, tal como se mencionó en la sección de metodología (ver sección 3.5.3), se aplicó un filtro para poder obtener secciones representativas del glaciar Upsala, sin nubes y luego se calculó la variación de volumen en distintos intervalos de tiempo. La transformación de volumen a cambios de masa (en gigatoneladas).se muestra a continuación.

4.3.1. Glaciar Upsala

Al evaluar los cambios en el volumen del glaciar Upsala se aprecia la variación de volumen cada cuatro años entre 2005 y 2021 (2005-2009, 2009-2013, 2013-2017, 2017-2021).

La pérdida más grande ocurrió entre 2005 y 2009, con una pérdida de volumen de 2.93 km^3 y 2.69 gigatoneladas de masa. Los periodos siguientes presentan pérdidas más pequeñas, la menor cercana a 0.057 km^3 y 0.052 Gt de cambio entre los años 2009 y 2013. Posterior a este, se presentan mayores pérdidas, con 1.2 y 1.7 km^3 para los periodos entre 2013-2017 y 2017-2021 respectivamente.

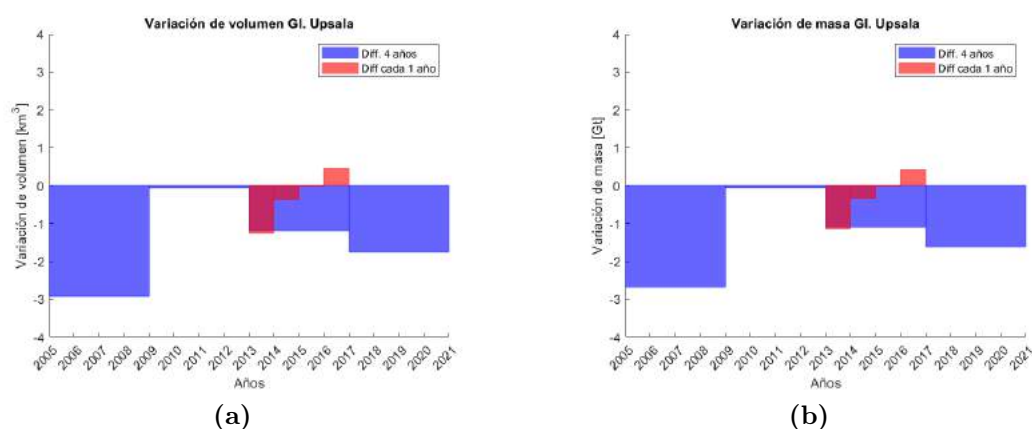


Figura 4.3.1: Variación de volumen para el glaciar Perito Moreno en km^3 (a). Presentando los cambios en los rectángulos azules, significando pérdida de volumen para valores negativos y ganancia para positivos. Diferencia anual en rectángulos rojos realizando la diferencia entre años para los periodos 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016, 2016-2017. Transformación de volumen a masa perdida (ganada) por el glaciar para los mismos periodos que en el caso del volumen (b).

Cabe destacar que, en adición a los intervalos de 4 años, también se realizaron variaciones anuales. El periodo considerado fue 2013-2017, con los cambios de volumen existentes en el área seleccionada del glaciar. Es decir, para los intervalos 2013-2014, 14-15, 15-16 y 2016-2017. Estos se presentan en rectángulos rojos en ambas figuras, en variaciones de volumen y masa anual de igual manera.

Para los periodos 2013-2014, se presenta la mayor pérdida de volumen y masa, sobrepasando ligeramente los cambios vistos en los cálculos de 4 años. La magnitud fue de 1.25 km^3 y 1.14 Gt en variación en un solo año. Después de este periodo, los años 2014-2015 y 2015-2016 mostraron oscilaciones entre -0.4 y -0.02 km^3 de volumen.

Aunque se puede ver el cambio de volumen total en un rango de 4 años, como en la figura 4.3.1, pueden existir años atípicos. Un ejemplo es el periodo 2016-2017, que a diferencia de todos los otros periodos estudiados, este muestra una magnitud alrededor de 0.5 (0.45) km^3 (Gt) de volumen(masa) en un año.

Esto hace un contraste con lo calculado para intervalos anuales frente a intervalos de 4 años, donde en este último, se pudo apreciar una pérdida de volumen y masa del glaciar Upsala.

4.3.2. Glaciar Perito Moreno

En el caso del GPM, la variación de volumen se calculó directamente, sin considerar las variaciones de altura. Esto se debe a la falta de datos, un problema mayor al visto para la zona del glaciar Upsala. Según la metodología, se calculó directamente la variación de volumen con el DEM correspondiente a la fuente SRTM, sin una variación temporal, a diferencia de ASTER.

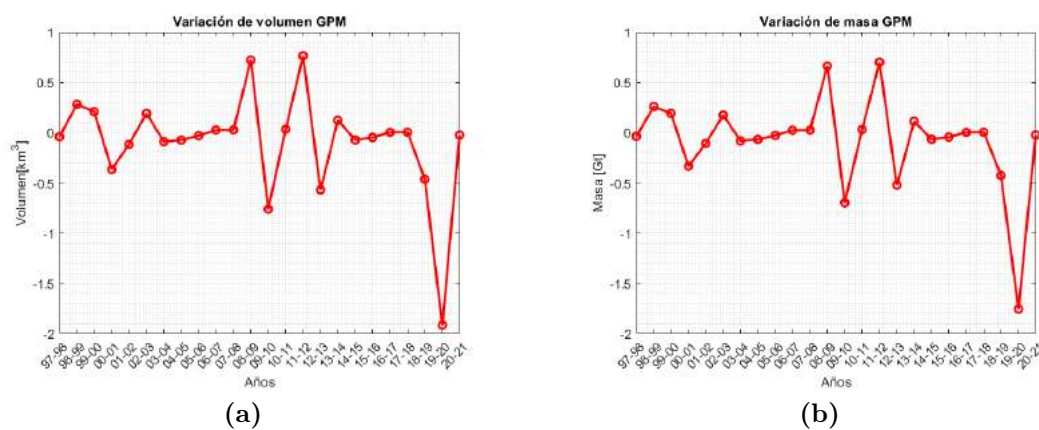


Figura 4.3.2: Variación de volumen para el glaciar Perito Moreno en km^3 (a). Transformación de volumen a masa perdida (ganada) por el glaciar para los mismos periodos que en el caso del volumen (b).

En el GPM, al igual que en la variación de superficie, no se notan cambios importantes. A lo largo del tiempo se observa una ganancia y pérdida de volumen (masa), sin una tendencia clara. Sin embargo, entre los años 2014-2020, se percibe una pérdida constante de volumen (masa), sin ningún aumento. Solo existen pérdidas o cambios cercanos a 0 durante estos años, con un peak negativo cercano a -2 entre los años 2019 y 2020.

4.4. Variación del nivel del lago Argentino y Brazo rico

Para el cálculo de la variación del nivel del lago Argentino y Brazo rico, se utilizó la metodología mencionada en la sección 3.5.4. Solo se consideró el aporte neto del glaciar Upsala y GPM, sin incluir otros procesos que afectan la variación de este mismo, como la lluvia, la evaporación y el derretimiento de nieve de otros

sectores. Para el lago Argentino, se consideró el aporte tanto del glaciar Upsala como del GPM, mientras que para Brazo rico, solo del GPM. En el caso del glaciar Upsala, se consideraron las variaciones de altura en cada periodo, como se hizo en la sección de cálculo de volumen. Para el GPM, se transformó el área del glaciar a un volumen determinado con su respectiva altura, sin variaciones en el tiempo, usando solo un DEM.

4.4.1. Glaciar Upsala

En el caso del glaciar Upsala, igual que, en la variación de volumen, se calculó la variación total del lago argentino durante un periodo de 4 años (para los mismos periodos de la sección de volumen) y entre los años 2013 y 2017, anualmente.

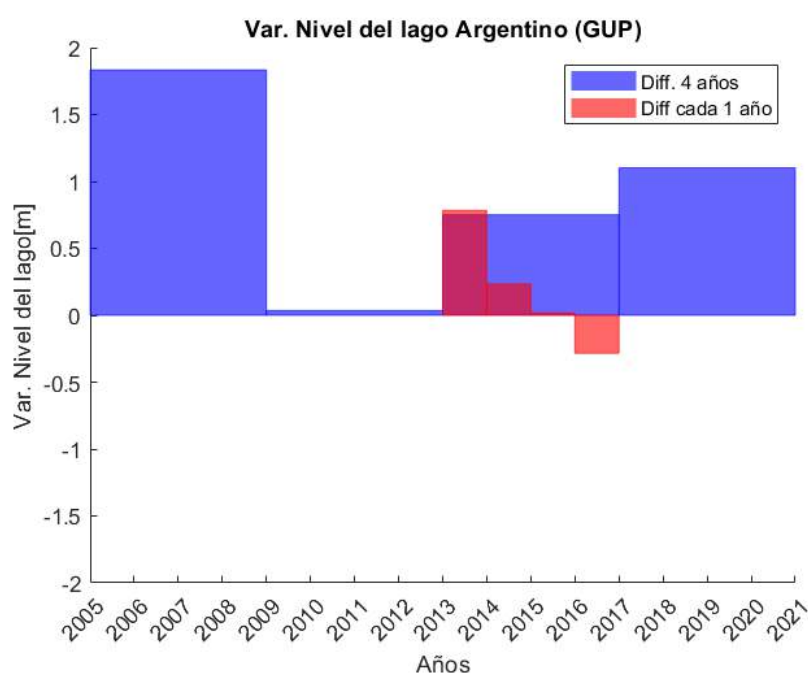


Figura 4.4.1: Variación teórica del nivel del lago Argentino solo considerando el aporte neto por derretimiento del glaciar Upsala sobre los 190 m.s.n.m. En rectángulos azules considera los periodos con diferencias de 4 años (2005-2009, 2009-2013, 2013-2017, 2017-2021) y en rojo variaciones anuales entre 2013 y 2017.

La figura 4.4.1 muestra el aporte de agua del glaciar Upsala al lago Argentino. Entre 2005-2009, período de mayor pérdida de volumen para el glaciar, el aporte fue el más alto, traduciéndose en un incremento de más de 1.8 metros en cuatro años debido al derretimiento neto del hielo. Sin embargo, entre 2009-2013, el

aporte disminuyó casi a cero.

Hubo un aumento en el aporte de agua en los periodos 2013-2017 y 2017-2021, con incrementos de aproximadamente 0.8 y 1.1 metros respectivamente. En este estudio, solo se consideraron las zonas del glaciar por encima de 190 m.s.n.m. La sección del glaciar sumergida en el lago no contribuye de forma significativa al nivel del lago, debido al desplazamiento de agua que provoca (Huss and Hock, 2015).

Al analizar el período anual entre 2013 y 2017, 2013-2014 presentó el mayor aporte de agua, llegando a un incremento de casi 0.8, equivalente a la diferencia de cuatro años. Los incrementos fueron menores en los siguientes años: menos de 0.3 en 2014-2015 y casi 0 en 2015-2016. En el último año analizado (2016-2017), aunque hubo un ligero aumento en el volumen, no se consideró que este aporte de agua tuviera un impacto significativo en el nivel del lago.

4.4.2. Glaciar Perito Moreno

En el caso del derretimiento del Perito Moreno no se consideró la variación de alturas que puede tener el glaciar durante este periodo. El aporte neto de agua que aportará el GPM será una transformación directa de los valores obtenidos de cambios de superficie de este al aporte de agua, traducido a variación en metros que tendrán estas dos masas de agua. Para el caso del lago Argentino se consideró que el 68 % del derretimiento irá hacia este, mientras que el 32 % restante en Brazo rico. Similar al caso del glaciar Upsala, se realizó la conversión por encima de la altura sobre el nivel del mar del lago Argentino y se supuso la misma altura para el Brazo rico (190 metros).

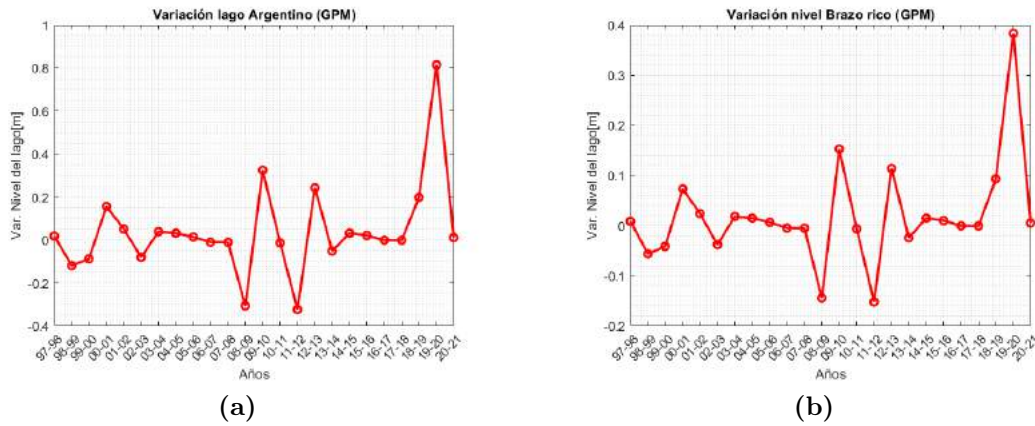


Figura 4.4.2: Variación teórica del nivel del lago Argentino (a) y Brazo rico (b) solo considerando el aporte neto por derretimiento del glaciar Perito Moreno sobre los 190 m.s.n.m.

Solo se tuvieron en cuenta los valores positivos del gráfico, los cuales representan ganancias en metros. Los picos más claros se observan en 2009-2010, superando los 0.3 y 0.15, además de un aumento cercano a 0.25 y 0.12 (2010-2011) para los lagos Argentino y Brazo Rico, respectivamente. Como ha sido la tendencia en el análisis de todos los años del Perito Moreno, el mayor aumento se dio en los últimos años, específicamente 2018-2020, cuando se observó una disminución circunstancial de la superficie del GPM. En este período, el aumento del nivel del agua osciló entre 0.2 y 0.8 para el lago Argentino, y entre 0.1 y 0.4 para Brazo Rico.

4.5. Comparación datos climáticos

La metodología usó datos ERA5 para obtener la variación de temperatura durante el periodo de estudio, validados por estaciones meteorológicas en la comunidad de El Calafate, ubicada en las orillas del Lago Argentino (**Sec. 3.6.1**). Para precipitación, se usaron datos del CR2MET (Boisier et al., 2018). Se utilizó la serie de la estación del glaciar O'Higgins, situado al norte del Parque Nacional Los Glaciares, próximo al Lago San Martín en Chile. El objetivo era representar mejor la precipitación relevante para los cambios del glaciar. Se calculó la precipitación total acumulada anual desde 1987 hasta 2020, con fines de correlaciones con desfases hasta 10 años. Los datos de ERA5 proporcionaron el promedio total del campo de temperaturas. Tras esto, se calculó el promedio anual de temperaturas, dando un valor correspondiente al promedio anual de

todo el campo de temperaturas de ERA5.

Se compararon las variables meteorológicas (temperatura a 2 metros y precipitación) con la superficie del glaciar Upsala y Perito Moreno, y la variación anual de cada uno. Primero, se normalizó las series de superficie, variación de superficie, precipitación y temperatura. Luego se realizó una comparación visual mediante un gráfico de las variables meteorológicas y las obtenidas en este estudio. Se calcularon las correlaciones entre las series, comparando la temperatura de la zona con la superficie total anual del glaciar y la variación de superficie del glaciar, además de la precipitación comparando con estas mismas variables. Se hizo tanto para el glaciar Upsala como para el Perito Moreno.

4.5.1. Temperatura

Se compararon ambas variables de superficie tanto para el glaciar Upsala con el Perito Moreno con la serie obtenida a partir de datos ERA5. Las tres series (temperatura, superficie total y variación de superficie) fueron normalizadas para su comparación

4.5.1.1. Glaciar Upsala

Lo más notable en el glaciar Upsala es el contraste entre ambas pendientes al comparar la serie de superficie total del glaciar con la serie de temperaturas, donde esta última, a lo largo del periodo de estudio, tiene una pendiente de ≈ 0.07 , la cual aumenta de forma significativa después del año 2010 a ≈ 0.14 . Se ve una clara tendencia al aumento de las temperaturas promedio en esta zona, coincidiendo con lo visto a escala global (IPCC, 2022).

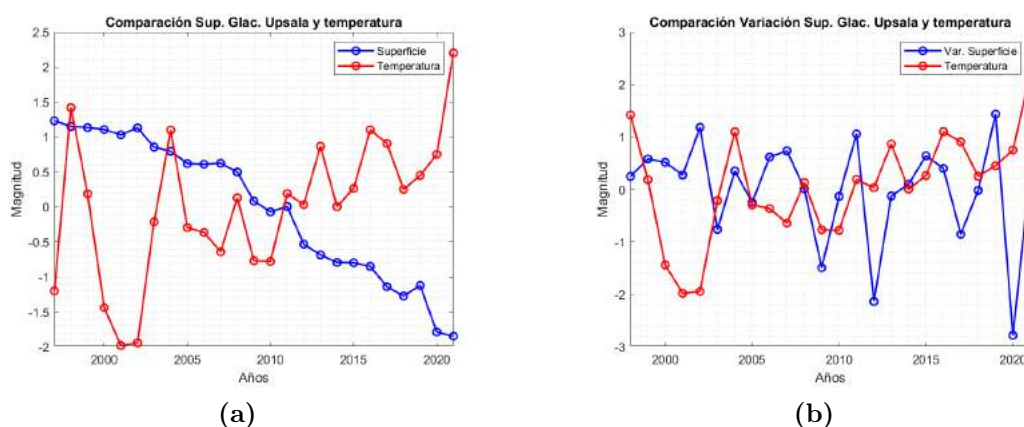


Figura 4.5.1: Comparación entre superficie total de glaciar Upsala a lo largo de los años, en azul temperatura promedio del campo obtenido a partir de ERA5, en rojo variación de superficie para GPM(a). Comparación entre variación de superficie para el glaciar Upsala en rojo y misma temperatura obtenida a partir de ERA5 en azul (b).

Al comparar ambas series en el glaciar Upsala, no se aprecian grandes similitudes entre las curvas, más allá de la clara diferencia de pendientes mencionada. Esto se debe principalmente a los pocos cambios drásticos en la serie de superficie total del glaciar Upsala, que, como se menciona en la sección anterior, ha tenido una disminución constante en el tiempo, aunque sus pérdidas no han sido drásticas año tras año.

En el caso de la variación de superficie, a diferencia del caso anterior, existen picos negativos para el glaciar Upsala con pérdidas de superficie considerables en los años 2012 y 2020. Comparándola con la serie de temperatura, se aprecian pequeños desfases de un año entre pequeños aumentos de temperatura (2010-2011 y 2015-2016), al igual que la ganancia de superficie del glaciar en 2002.

4.5.1.2. Glaciar Perito Moreno

La comparación visual entre las series para el glaciar Perito Moreno, al igual que el glaciar Upsala, se presenta en relación con el cambio de temperatura en el tiempo.

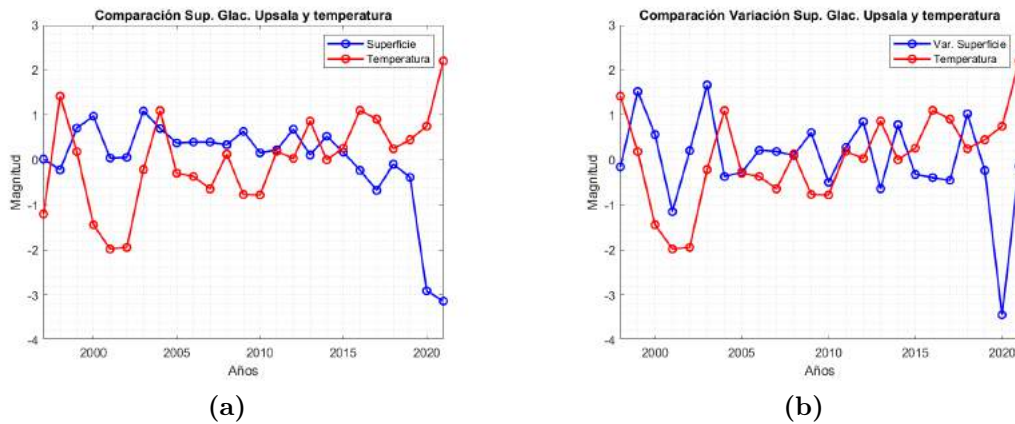


Figura 4.5.2: Comparación entre superficie total de glaciar Perito Moreno a lo largo de los años, en azul temperatura promedio del campo obtenido a partir de ERA5, en rojo variación de superficie para GPM(a). Comparación entre variación de superficie para el glaciar Perito Moreno en rojo y misma temperatura obtenida a partir de ERA5 en azul (b).

Se resalta el cambio final del periodo para la superficie total del GPM, con un notable aumento de temperatura después de 2014, junto con la reciente disminución del GPM, contraria a años anteriores. No obstante, no se nota una correlación clara entre las series de variación de superficie, con la superficie total del GPM oscilando entre ganancia y pérdida, excluyendo el último periodo mencionado.

4.5.2. Precipitación

En el análisis de la precipitación, al igual que en la temperatura, las series se normalizaron después de calcular la precipitación anual acumulada para la estación “Glaciar O’Higgins”. La serie de precipitación anual se comparó con la superficie total del glaciar a lo largo del tiempo y la variación anual del glaciar.

4.5.2.1. Glaciar Upsala

La comparación directa entre la superficie total del glaciar Upsala y la precipitación de la estación **Fig. 4.5.3(a)** no revela una clara relación entre ambas series, al igual que en el caso de la temperatura. Tampoco se aprecia una tendencia clara en la serie de precipitación, ya sea un aumento o una disminución a lo largo del periodo de estudio.

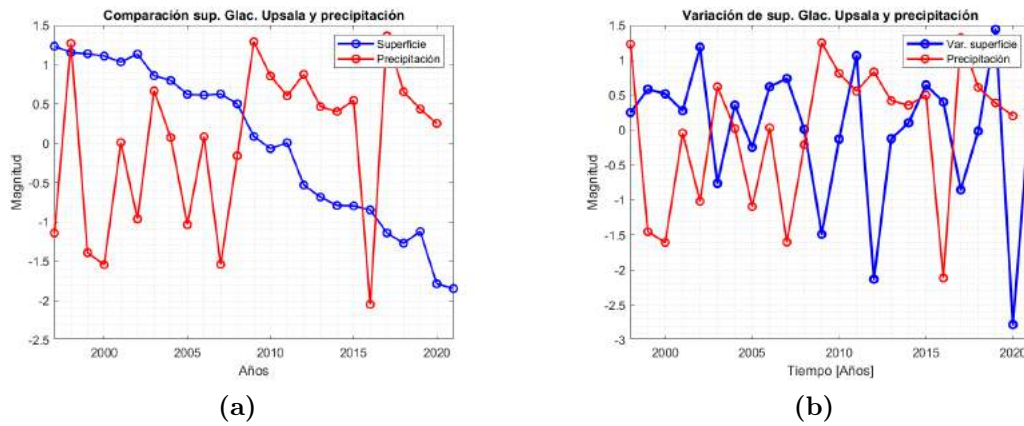


Figura 4.5.3: Comparación entre superficie total(a) de glaciar Upsala a lo largo de los años. En azul la precipitación acumulada para cada año obtenida a partir de datos CR2MET en la zona del Glaciar O'Higgins, en rojo superficie glaciar. Comparación entre variación de superficie (b) para el glaciar Upsala en rojo y misma precipitación obtenida a partir de CR2MET en azul.

Las variaciones notorias para la superficie total del glaciar (años 2002, 2011 y 2019) tienen un desfase de 2 a 4 años con los aumentos de precipitación de los años 1998, 2008-2009 y 2017. Estos últimos corresponden a los valores máximos de precipitación en la serie, superando en los tres casos los 1600 mm anuales. En contraste, en los años 2016 y 2020 hubo un mínimo de precipitación, coincidiendo con la reducción notoria de superficie en 2020 (variación de $\approx 15\text{km}^2$). Este mínimo está asociado al fenómeno de El Niño en su fase positiva.

4.5.2.2. Glaciar Perito Moreno

Para el caso del glaciar Perito Moreno, ambas series presentan una pendiente similar, tanto para la superficie total como de variación de superficie. Sin embargo, al igual que en con el glaciar Upsala, no se distingue una clara relación entre los cambios en la precipitación en la zona del glaciar O'Higgins y aquellos del GPM.

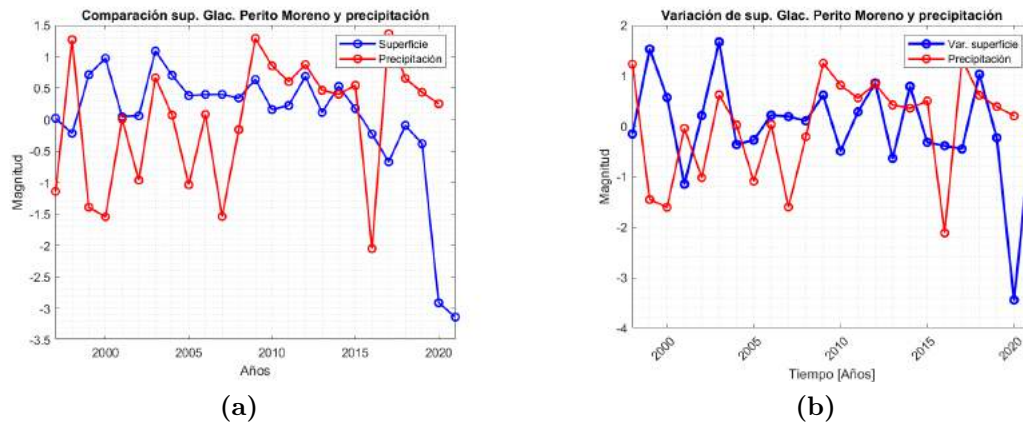


Figura 4.5.4: Comparación entre superficie total(a) de glaciar Perito Moreno a lo largo de los años, en azul precipitación acumulada para cada año normalizada obtenida a partir de datos CR2MET en la zona del glaciar O'Higgins, en rojo superficie glaciar Perito Moreno normalizada. Comparación entre variación de superficie (b) para el glaciar Perito Moreno en rojo y misma precipitación obtenida a partir de CR2MET en azul.

Los eventos destacados entre ambas series son el desfase de 4 años observado para el glaciar Upsala con las bajas lluvias en 2016, y la variación del GPM en 2020 cuando disminuye la superficie total. También se observa un aumento significativo de la superficie total del glaciar Upsala 5 años después del año de mayor precipitación (1998). No se identifica una relación clara entre los cambios de las variables en otros años.

4.5.3. Correlación glaciares con datos climáticos

Las correlaciones calculadas entre las series del glaciar Upsala y Perito Moreno revelaron conexiones con variables de temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Además, se analizó cada serie a lo largo del periodo de estudio, considerando una reacción retardada del glaciar ante el cambio de diferentes variables climáticas, con un desfase de 1 a 10 años. Se considera, que la reacción del mismo glaciar no es inmediata al cambio de diferentes variables climáticas (Raper and Braithwaite, 2009). Los cambios más notables se detectaron en la precipitación, donde la nieve necesita tiempo para transformarse en "Firn" o "Neviza" y, finalmente, en hielo glacial (Benn and Evans, 2014).

	Temperatura	Precipitación	Radiación
Sin desfase	-0.608	0	-0.076
Desfase de 1 año	-0.527	-0.305	0.033
Desfase de 2 año	-0.475	-0.364	0.134
Desfase de 3 año	-0.411	-0.421	0.225
Desfase de 4 año	-0.368	-0.308	0.169
Desfase de 5 año	-0.348	-0.270	0.160
Desfase de 6 año	-0.316	-0.486	0.347
Desfase de 7 año	-0.248	-0.370	0.382
Desfase de 8 año	-0.171	-0.288	0.244
Desfase de 9 año	-0.078	-0.278	0.328
Desfase de 10 año	0.026	-0.148	0.368

Cuadro 4.5.1: Correlaciones para la superficie total del glaciar Upsala con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Ambas series con pendiente. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.

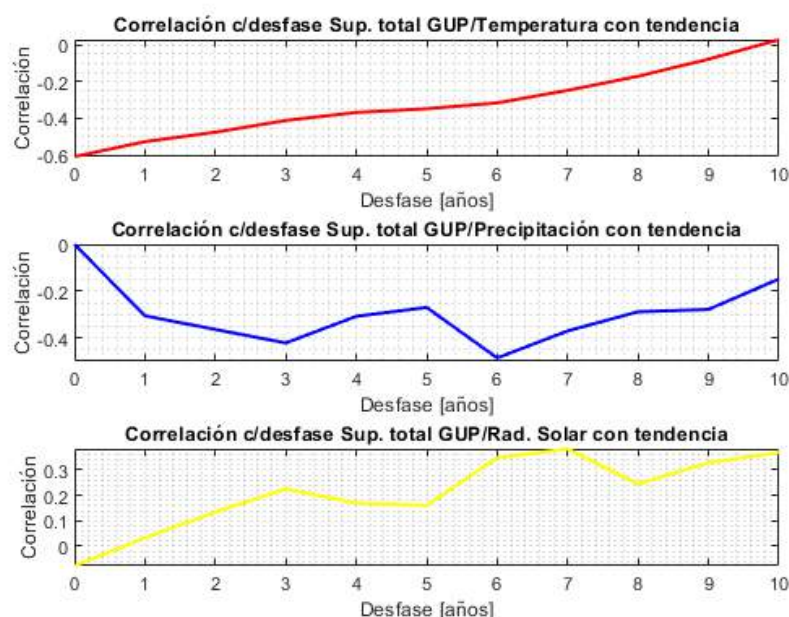


Figura 4.5.5: Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de superficie total del glaciar Upsala, Ambas series con pendiente.

Debe mencionarse que la correlación sin desfase para la precipitación no se pudo calcular, ya que no cubre completamente el periodo de estudio. Sin embargo, las correlaciones más altas estuvieron vinculadas a la temperatura, fluctuando entre

-0.35 y -0.6, y disminuyendo gradualmente a medida que aumentaba el desfase. La precipitación mostró correlaciones interesantes, con un máximo con un desfase de 6 años con un -0.48 de correlación. En el caso de la radiación, las mayores correlaciones se situaron entre el 0.36 y el 0.38 con desfases de 10 y 8 años.

Además de las correlaciones entre las series, se extrajo la tendencia de cada una, dado las notables tendencias que presentaban las series de temperatura y superficie del glaciar. Los mismos cálculos se realizaron para las series sin tendencia.

Los mismos cálculos para las series sin tendencia son presentadas en el cuadro 4.5.2.

	Temperatura	Precipitación	Radiación
Sin desfase	-0.29	0	-0.18
Desfase de 1 año	-0.35	-0.131	-0.22
Desfase de 2 año	-0.11	-0.032	-0.08
Desfase de 3 año	-0.04	-0.315	0.22
Desfase de 4 año	-0.11	0.047	-0.09
Desfase de 5 año	-0.33	0.118	-0.31
Desfase de 6 año	-0.20	0.009	-0.01
Desfase de 7 año	-0.21	-0.184	0.08
Desfase de 8 año	-0.12	-0.338	0.06
Desfase de 9 año	-0.17	-0.302	0.15
Desfase de 10 año	-0.15	-0.117	0.03

Cuadro 4.5.2: Correlaciones para la superficie total del glaciar Upsala con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Para este caso las correlaciones fueron realizadas a series en donde les fue extraída la tendencia. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.

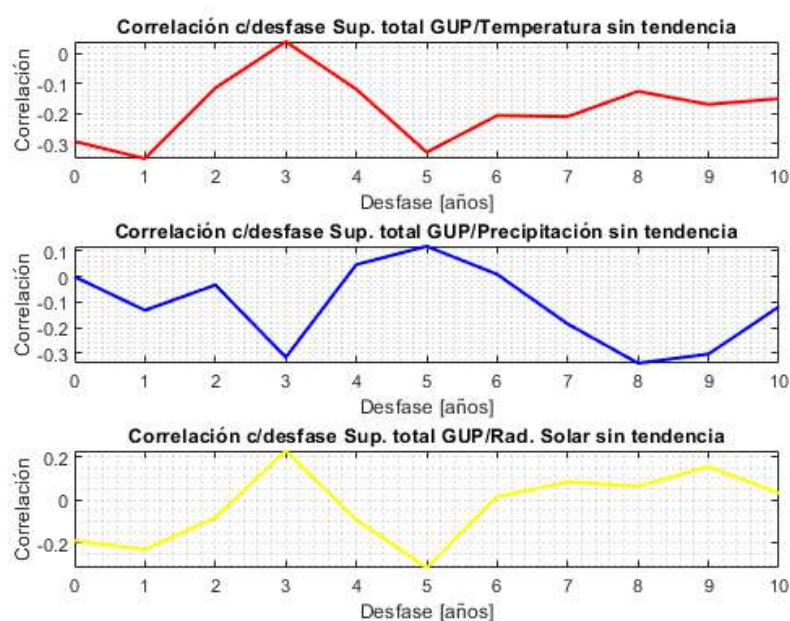


Figura 4.5.6: Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de superficie total del glaciar Upsala, Ambas series sin pendiente.

Al evaluar la serie sin tendencia considerando la superficie total del glaciar Upsala, las mayores correlaciones para la temperatura se observarán con solo un año de desfase, alcanzando una correlación de aproximadamente -0.35, y con un desfase de 5 años con -0.33 de correlación. Como se puede intuir, muchas de las correlaciones calculadas en estos casos, especialmente para la temperatura, estarán ligadas al aumento sostenido de estas en la zona y a la disminución progresiva de la superficie del glaciar.

	Temperatura	Precipitación	Radiación
Sin desfase	-0.511	0	-0.320
Desfase de 1 año	-0.249	-0.074	0.093
Desfase de 2 año	-0.325	-0.170	0.049
Desfase de 3 año	-0.475	-0.271	-0.007
Desfase de 4 año	-0.473	-0.101	-0.215
Desfase de 5 año	-0.285	0.047	-0.221
Desfase de 6 año	-0.192	-0.257	0.157
Desfase de 7 año	-0.240	-0.330	0.271
Desfase de 8 año	-0.308	-0.414	0.127
Desfase de 9 año	-0.237	-0.335	0.159
Desfase de 10 año	0.0171	-0.215	0.379

Cuadro 4.5.3: Correlaciones para la superficie total del glaciar Perito Moreno con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Ambas series con tendencia. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.

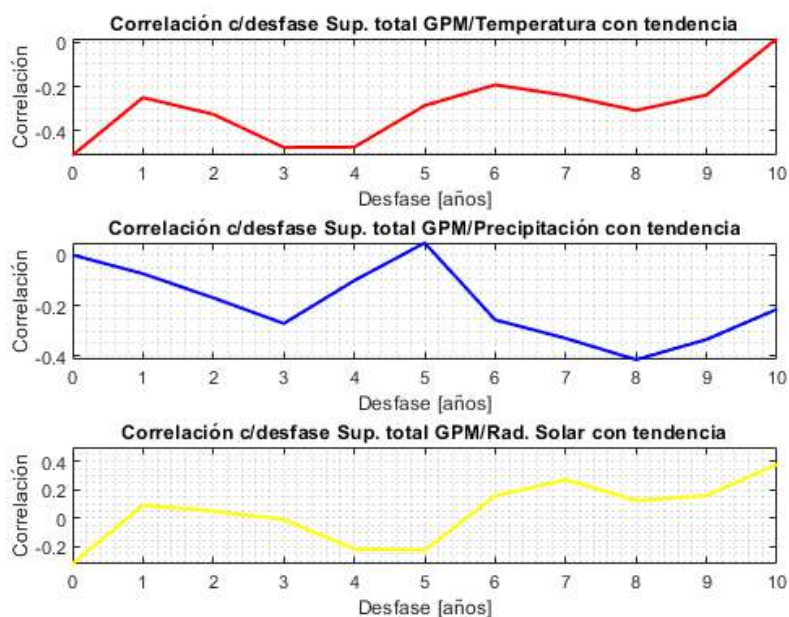


Figura 4.5.7: Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de superficie total del glaciar Perito Moreno, Ambas series con pendiente.

A diferencia del glaciar Upsala (sin contar la correlación sin desfase) las mayores correlaciones del GPM estarán con un desfase de entre 3 y 4 años para el caso de

la temperatura y precipitación, -0.47 y -0.31 respectivamente. Para la radiación, la mayor correlación se encontró en la sección con mayor desfase (10 años), con un 0.38.

	Temperatura	Precipitación	Radiación
Sin desfase	-0.24	0	-0.36
Desfase de 1 año	0.03	0.116	0.055
Desfase de 2 año	-0.07	0.054	-0.049
Desfase de 3 año	-0.3	-0.073	-0.13
Desfase de 4 año	-0.35	0.116	-0.4
Desfase de 5 año	-0.15	0.281	-0.43
Desfase de 6 año	-0.03	0.043	-0.058
Desfase de 7 año	-0.15	-0.167	0.065
Desfase de 8 año	-0.27	-0.355	-0.013
Desfase de 9 año	-0.25	-0.257	-0.02
Desfase de 10 año	0.02	-0.175	0.19

Cuadro 4.5.4: Correlaciones para la superficie total del glaciar Perito Moreno con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Para este caso las correlaciones fueron realizadas a series en donde les fue extraída la tendencia. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.

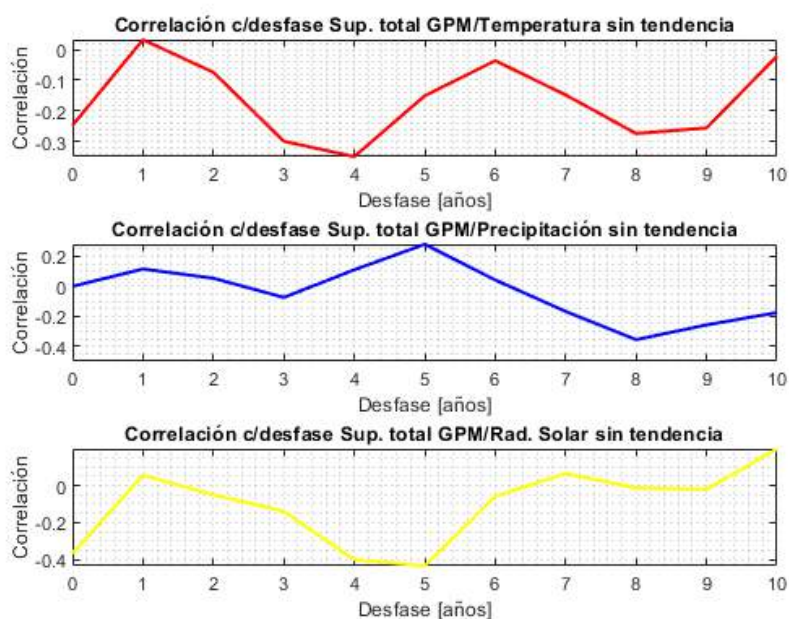


Figura 4.5.8: Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de superficie total del glaciar Perito Moreno, Ambas series sin pendiente.

A partir del Perito Moreno se extrajo la tendencia. En ambos contextos la temperatura muestra la mayor correlación con un desfase de 4 años (-0.35) y la radiación aporta un 0.4. Se suma una correlación del 0.43 con 5 años de desfase. Sin embargo, con la precipitación se presenta una correlación negativa de 0.36 y una positiva cercana al 0.3 al considerar un desfase de 5 y 8 años entre las series de precipitación y la superficie total del glaciar.

Se llevó a cabo un procedimiento similar a los cálculos de correlación anteriores, con una diferencia: en lugar de usar la superficie total de temperatura, las correlaciones se calcularon a partir de cada una de las series de variables climáticas (temperatura, precipitación y radiación) y la variación de superficie de cada uno de los glaciares. Se muestra el caso del glaciar Upsala en 4.5.1 (b). Se repitió el mismo proceso, es decir, correlación con y sin tendencia, y uso de desfases de entre 0 a 10 años. Se presenta el caso del glaciar Upsala sin extraer la tendencia a las series (cuadro 4.5.5).

	Temperatura	Precipitación	Radiación
Sin desfase	-0.141	0	0.245
Desfase de 1 año	-0.176	0.057	-0.198
Desfase de 2 año	0.111	-0.046	0.272
Desfase de 3 año	0.108	-0.369	0.455
Desfase de 4 año	-0.163	0.341	-0.292
Desfase de 5 año	-0.336	-0.097	-0.140
Desfase de 6 año	-0.048	-0.062	0.226
Desfase de 7 año	-0.0187	-0.144	0.020
Desfase de 8 año	0.096	-0.122	0.002
Desfase de 9 año	-0.106	0.044	0.092
Desfase de 10 año	0.0573	0.169	0.025

Cuadro 4.5.5: Correlaciones para la variación de superficie del glaciar Upsala con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Ambas series con tendencia. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.

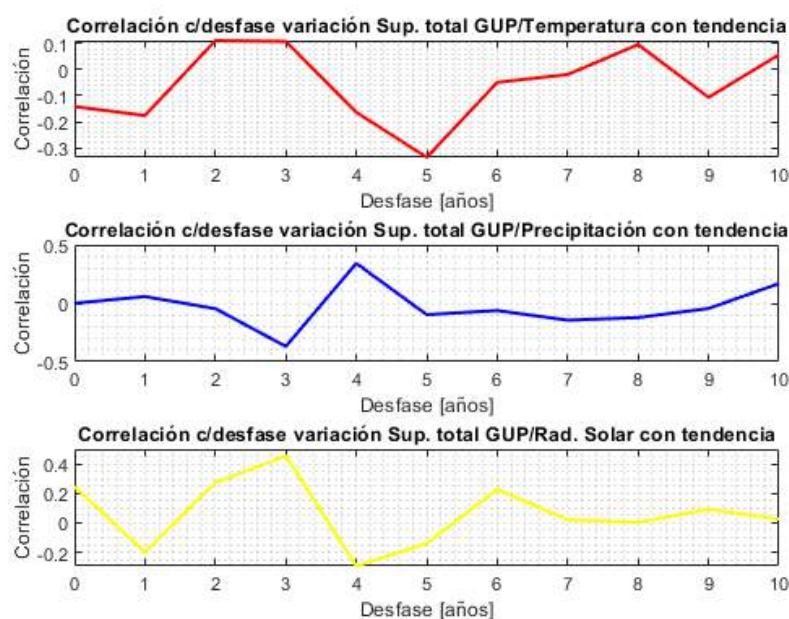


Figura 4.5.9: Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de variación de superficie del glaciar Upsala, Ambas series con pendiente.

Para este caso, las correlaciones no son grandes. Al considerar las variables climáticas y el desfase entre series, la mayoría no supera el 0.3 de correlación en

ningún caso. Solamente se ve superado este umbral en el caso de la temperatura con un desfase de 5 años (-0.336), en la precipitación con desfase de 3 y 4 años (-0.37 y 0.34 de correlación respectivamente) y para la radiación con desfase de 3 años (>0.35). En el caso de la misma variación del GUP, pero con tendencia extraída, los resultados son bastante similares al caso anterior. Se nota un aumento en la correlación entre la variación de superficie y la precipitación llegando a un 0.44 con un desfase de 4 años y una correlación de aproximadamente 0.22 para 10 años de desfase.

	Temperatura	Precipitación	Radiación
Sin desfase	-0.012	0	0.274
Desfase de 1 año	-0.056	0.150	-0.236
Desfase de 2 año	0.225	0.025	0.261
Desfase de 3 año	0.225	-0.291	0.437
Desfase de 4 año	-0.064	0.438	-0.344
Desfase de 5 año	-0.276	-0.037	-0.188
Desfase de 6 año	0.004	0.060	0.127
Desfase de 7 año	0.044	-0.028	-0.085
Desfase de 8 año	0.147	-0.044	-0.074
Desfase de 9 año	-0.093	0.003	0.019
Desfase de 10 año	0.059	0.214	-0.048

Cuadro 4.5.6: Correlaciones para la variación de superficie del glaciar Upsala con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Para este caso las correlaciones fueron realizadas a series en donde les fue extraída la tendencia. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.

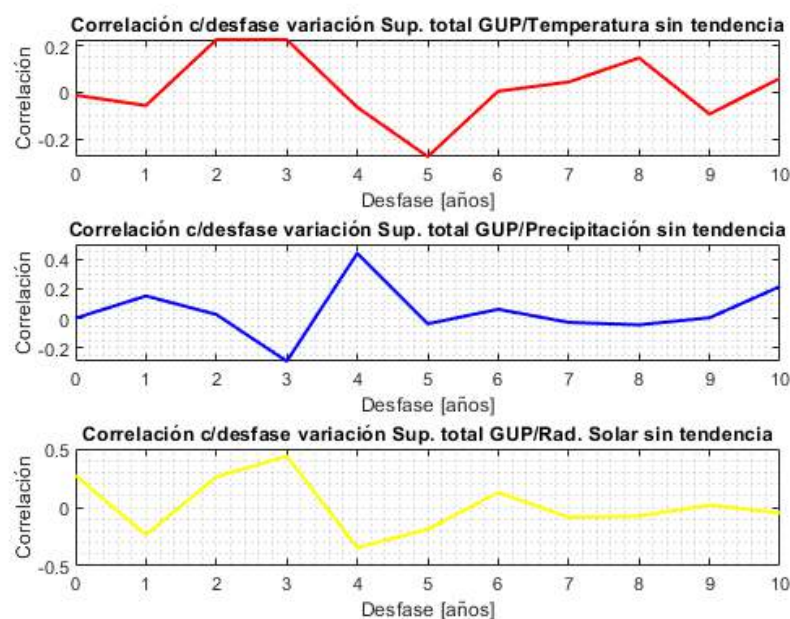


Figura 4.5.10: Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de variación de superficie del glaciar Upsala, Ambas series sin pendiente.

En el caso del GPM (Cuadro 4.5.7), es un escenario diferente al anterior. Se notan correlaciones negativas cercanas a un 0.35 al comparar la temperatura y la variación de superficie, siendo esta la correlación más alta entre series climáticas. Sólo en algunas ocasiones se supera el 0.25 de correlación al considerar precipitación y radiación (con temperatura llega a un 0.3 con 2 años de desfase).

	Temperatura	Precipitación	Radiación
Sin desfase	-0.166	0	-0.091
Desfase de 1 año	-0.005	0.043	0.204
Desfase de 2 año	-0.310	-0.197	-0.032
Desfase de 3 año	-0.350	-0.242	0.017
Desfase de 4 año	-0.124	0.11	-0.242
Desfase de 5 año	0.008	-0.071	0.074
Desfase de 6 año	-0.129	-0.066	0.178
Desfase de 7 año	-0.209	-0.277	0.055
Desfase de 8 año	-0.193	-0.251	0.066
Desfase de 9 año	-0.148	-0.003	-0.073
Desfase de 10 año	0.258	-0.033	0.430

Cuadro 4.5.7: Correlaciones para la variación de superficie del glaciar Perito Moreno con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Ambas series con tendencia. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.

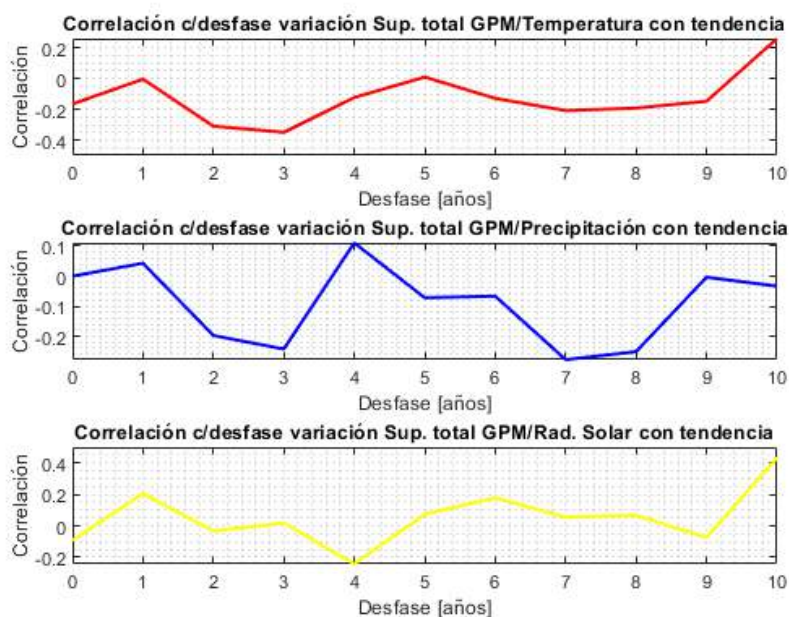


Figura 4.5.11: Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de variación de superficie del glaciar Perito Moreno, Ambas series con pendiente.

Finalmente, para el caso del GPM sin considerar la tendencia de ninguna de las series es posible apreciar una correlación cercana al 0.25 para el caso de la

precipitación al ver 4 años de desfase entre esta y la variación de superficie del GPM. Además de una correlación de -0.32 y 0.35 para el caso de la radiación con 4 y 10 años de desfase respectivamente.

	Temperatura	Precipitación	Radiación
Sin desfase	0.016	0	-0.067
Desfase de 1 año	0.175	0.177	0.172
Desfase de 2 año	-0.171	-0.105	-0.062
Desfase de 3 año	-0.209	-0.127	-0.027
Desfase de 4 año	0.018	0.242	-0.320
Desfase de 5 año	0.111	0.014	0.015
Desfase de 6 año	-0.059	0.109	0.035
Desfase de 7 año	-0.131	-0.120	-0.094
Desfase de 8 año	-0.135	-0.149	-0.040
Desfase de 9 año	-0.134	0.067	-0.188
Desfase de 10 año	0.276	0.022	0.351

Cuadro 4.5.8: Correlaciones para la variación de superficie del glaciar Perito Moreno con las variables, temperatura, precipitación y radiación neta en superficie. Para este caso las correlaciones fueron realizadas a series en donde les fue extraída la tendencia. Destacando con valores ennegrecidos correlaciones significativas mediante test de student considerando un 95 % de nivel de confianza.

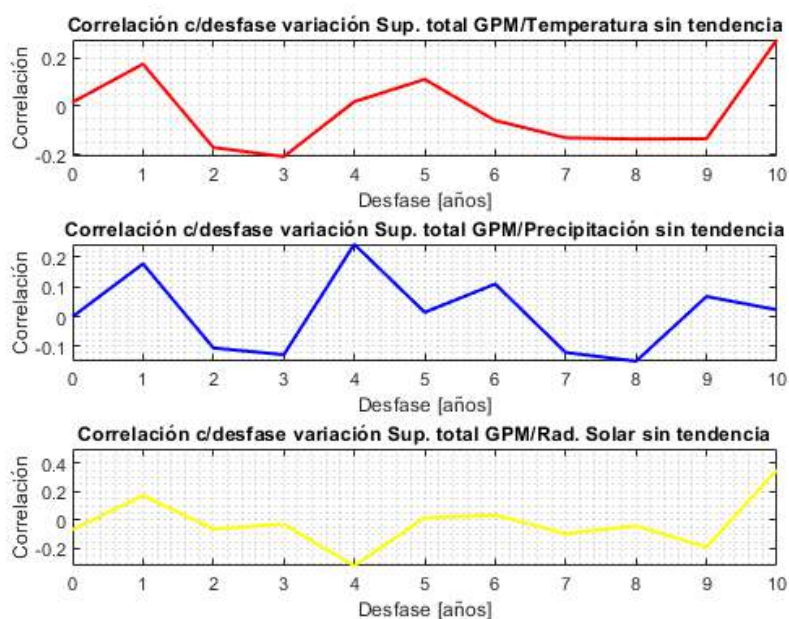


Figura 4.5.12: Gráfico de correlaciones para desfase de 0 a 10 años para las series de temperatura (rojo), precipitación (azul) y radiación solar en superficie (amarillo) con serie de variación de superficie del glaciar Perito Moreno, Ambas series sin pendiente.

Capítulo 5

Discusión

5.1. Metodología de delimitación

Este estudio, se enfoca en desarrollar una metodología para determinar la superficie de los glaciares y calcular aproximadamente la variación de volumen y la aportación de agua a los lagos terminales. Múltiples factores influyeron en los resultados iniciales al desarrollar estos métodos. Un aspecto a destacar es la elección de las imágenes. Esta zona, debido a su clima, comprende una alta presencia de nubes (inclusive durante el verano) y el glaciar, siendo de gran extensión, está ubicado en un lugar susceptible a la presencia de nubes (Path=231, Row=095). Por tanto, se optó por seleccionar varias imágenes para algunos años, sin más de 3 meses de diferencia entre ellas.

Pasando a la etapa posterior, los índices de nieve y hielo (NDSI, NDSII y S3) se utilizaron de manera específica en la zona de este estudio. Una particularidad observada fue que en variadas ocasiones las masas de agua conectadas al lago Argentino fueron calificadas como zonas cubiertas por nieve. Como resultado, se recurrió a una solución mencionada en la sección 3: Mediante el uso del NDWI, se generó una máscara de masas de agua que se sustrajo de la máscara NDSI.

Los DEMs de ASTER, con variación temporal similar a las imágenes Landsat, presentan gran cobertura de nubosidad, se optó por aplicar el filtro de nubes. Este filtro se implementó utilizando el umbral mencionado en la metodología. Posteriormente, se seleccionaron las zonas representativas de la zona de ablación

del glaciar Upsala. Se hizo una corroboración cuidadosa para asegurar que no existiera nubosidad en estas zonas seleccionadas.

Al llegar al momento de realizar la delimitación final, se encontró un problema en la presencia de debris o escombros sobre los glaciares. Los índices (NDSI, S3 o NDSII) que se utilizaron no demostraron capacidad para diferenciar entre debris y hielo glaciar. Ante esto, se tomó la decisión de aplicar la metodología de la temperatura superficial del glaciar. Esta metodología permite discriminar zonas bajo 10°C como posibilidad de ser glaciar cubierto por debris.

5.2. Variación de superficie de glaciares

El glaciar Upsala a lo largo de los años ha tenido una clara tendencia al retroceso sobre todo en su zona frontal. Distintos estudios hacen especial hincapié en la sección terminante en el lago Argentino, destacando el trabajo de Skvarca en 1995. quien ve un retroceso superior a los de 3 kilómetros entre 1970 y 1993. El frente glaciar retrocede aproximadamente 2 km en un rango de 20 años (entre 1970 y 1990), seguido por un retroceso de aproximadamente 1 kilometro, entre 1990 y 1993. Aunque el retroceso durante estos últimos tres años presenta una magnitud inferior, es importante destacar que en solamente 3 años el frente del glaciar retrocedió aproximadamente la mitad de la distancia a lo retrocedido durante los 20 años anteriores.

Esta tendencia al retroceso del glaciar Upsala ha continuado hasta en los últimos años de estudio. En particular, se ha observado un retroceso similar al observado con una rapidez similar entre los años 1990 y 1993. Este estudio encontró un retroceso de aproximadamente 4 kilómetros entre marzo de 1998 hasta enero del 2022.

Además de la sección terminante en el lago Argentino, el glaciar Upsala también está retrocediendo en el lago Guillermo. Como en el caso del lago Argentino, el retroceso en el lago Guillermo ha llevado a la formación de este último, aumentando su volumen de agua. Sin embargo, la mayoría del flujo del glaciar Upsala se dirige hacia la zona del brazo Argentino, con solo una pequeña porción aportando al lago Guillermo (Moragues et al., 2017).

El retroceso del glaciar Upsala ha llegado hasta tal punto que durante los últimos años de este estudio (marzo 2022) se puede apreciar cómo se ha ido adelgazando la conexión que existe entre la lengua del glaciar Upsala y el glaciar Bertacchi (**Fig.4.1.5**). Si continua el acelerado ritmo de retroceso observado durante los últimos años, podríamos ver una separación completa entre estas dos secciones. Además, ha habido un retroceso en la línea de nieve de los glaciares presentes en el complejo Upsala.

El glaciar Perito Moreno, por otro lado, ha mostrado una variación en su tamaño, oscilando entre la ganancia y la pérdida de superficie a lo largo del período de estudio (Skvarca, 2002). Sin embargo, durante los últimos cinco años, ha habido un retroceso progresivo en la zona frontal del glaciar (Tamburini Beliveau and Reato, 2023), donde no se habían observado retrocesos sostenidos en estudios anteriores. Este retroceso ha llevado a la aparición de rocas en el interior del glaciar, un signo de pérdida de masa. También se ha observado (visibles al utilizar el NDWI) un adelgazamiento en la sección del “brazo” del Perito Moreno (**Fig. 4.1.8**), que ha llevado a la formación de pequeñas masas de agua. Pequeñas secciones cercanas a las rocas, que no estaban presentes en los datos GLIMS o estaban presentes, pero no tan visibles, también han ido perdiendo masa progresivamente. Esta pérdida de masa ha dejado al descubierto más rocas en la base del glaciar, particularmente en la sección al sur del brazo del GPM, que se encuentra en el límite de la zona de ablación del glaciar.

5.3. Variación volumen del glaciar Upsala

A través del modelo de elevación digital, se observa la variación de volumen en las áreas representativas del glaciar. En la sección anterior se mencionó la constante pérdida de superficie total del glaciar Upsala. Sin embargo, es posible notar que a largo plazo (considerando intervalos de 4 años) existe no solo un retroceso del glaciar, sino también una disminución en la altura promedio en distintas zonas. Este fenómeno indica una reducción de volumen y, por ende, una pérdida de masa (en Gigatoneladas). Como resultado, hay un aumento en el nivel del lago Argentino en metros.

A pesar de la pérdida de volumen total de la superficie del glaciar, esta es

principalmente observable a largo plazo. Al contrastar los intervalos de 4 años, entre 2013 y 2017, se pueden ver cambios en el volumen anual. Entre estos años, existen 3 periodos donde la masa y el volumen del glaciar Upsala disminuyen. Sin embargo, en el último periodo (2016-2017) se ve un aumento de volumen, lo que indica que no hubo una pérdida de altura en las áreas representativas seleccionadas del glaciar Upsala.

Es importante mencionar que, aunque hay una pérdida de superficie total del glaciar, existe un contraste entre la masa perdida por retroceso del glaciar y la pérdida en el glaciar mismo.

De igual manera se presentó la masa total perdida por el glaciar en giga toneladas, en donde evidentemente la magnitud no se verá gran cambio al compararla con el volumen debido a la densidad del hielo, la cual es usada para la transformación de volumen a masa siendo esta cercana a uno ≈ 0.91 , por lo que solamente se ve una pequeña disminución de la magnitud al comparar volumen y masa.

5.4. Correlaciones

El estudio de correlaciones con diversas variables climáticas indica las más significativas para el glaciar Upsala. Se observan correlaciones de temperatura que oscilan entre -0.6 sin desfase y -0.35 con un desfase máximo de 5 años. Cuando son comparadas las series de tiempo de temperatura con las del Perito Moreno, se presentan correlaciones de menos magnitud y en número, fluctuando entre -0.51 y -0.48 aproximadamente. Al extraer la tendencia de estas series, se encuentran correlaciones más bajas; para el Perito Moreno y el Upsala, ninguna superará el -0.35 de correlación. Los desfases máximos son de 1 y 5 años para el glaciar Upsala y 4 años para el GPM.

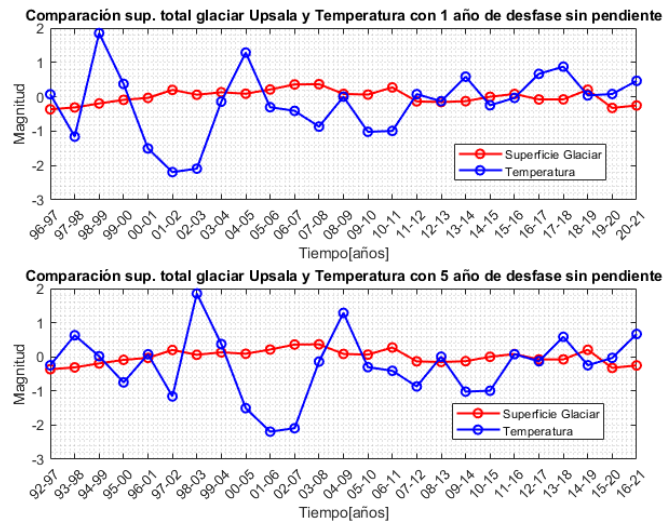


Figura 5.4.1: Comparación entre series de temperatura y superficie de glaciar Upsala, ambas sin tendencia con 1 año de desfase en la serie de temperatura (arriba) y 5 años de desfase (abajo) las cuáles serán las que presenten mayores correlaciones para las series sin tendencia considerando el glaciar Upsala.

Evaluando la variación de la superficie de ambos glaciares, la correlación más grande está en un desfase de 5 años. Sin embargo, al extraer la tendencia de la serie, no se encuentra ninguna correlación significativa para el glaciar Upsala. Lo mismo ocurre con el GPM, que tiene una mayor correlación de -0.35 a un desfase de 3 años; la única correlación significativa. No existe significancia estadística cuando se evalúa la serie sin desfase. Debido a estas tendencias fuertes, la mayor parte de la correlación para la temperatura entre el GPM y el glaciar Upsala se debe a ellas. Esto se relaciona con estudios que señalan cambios significativos en glaciares alrededor del mundo debido al cambio climático y al aumento de la temperatura media del planeta (Davies et al., 2014).

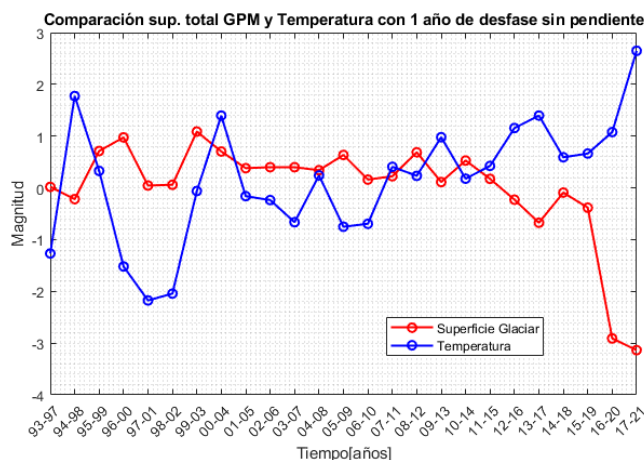


Figura 5.4.2: Comparación entre series de temperatura y superficie de glaciar Perito Moreno, ambas sin tendencia con 1 año de desfase en la serie de temperatura (arriba) y 5 años de desfase (abajo) las cuáles serán las que presenten mayores correlaciones para las series sin tendencia considerando el glaciar Upsala.

Al analizar la precipitación, se observa una situación distinta a la de la temperatura. Hay una considerable variabilidad en las correlaciones, que varían de positivas a negativas dependiendo del desfase. Esto se mantiene incluso al considerar las correlaciones con significancia estadística según el test de student. Ante esta complejidad, resulta difícil prever cómo las precipitaciones influirán en los cambios del glaciar. Los datos de precipitación en distintas zonas presentan su propia dificultad, ya que, aunque se cuentan con datos de una zona cercana a los glaciares Upsala y Perito Moreno (Glaciar O'Higgins) en la Patagonia, la variabilidad en las precipitaciones es alta (Garreaud et al., 2013). Esto es especialmente cierto para la zona de este estudio, que se sitúa en un lugar intermedio entre las precipitaciones vinculadas a vientos del Pacífico y los que provienen del este de Argentina (Garreaud et al., 2009).

Un problema importante surge al considerar únicamente la precipitación. No es posible distinguir entre precipitación líquida y en forma de nieve. El conocimiento de las variaciones de la isoterma 0 en la zona y los momentos en los que la precipitación puede considerarse un aporte al glaciar requerirían un estudio más detallado. Además, se puede contemplar que una mayor cantidad de precipitación en forma de agua líquida puede afectar negativamente al retroceso del glaciar, provocando su erosión (Koppes et al., 2015). Esto podría explicar las correlaciones negativas entre la superficie de ambos glaciares y la serie de

precipitación.

Por último, al considerar la radiación solar, las correlaciones no muestran una gran relevancia, siendo igualmente variables dependiendo de los desfases.

Capítulo 6

Conclusión

Este estudio delimitó el conjunto de glaciares incluidos en el glaciar Upsala y el glaciar Perito Moreno, ubicados en el Parque Nacional Los Glaciares en Argentina, provincia de Santa Cruz, durante el período 1997-2021. Se utilizaron imágenes Landsat 5, 7 y 8 y diversas técnicas de percepción remota como falso color, índices espectrales y temperatura de superficie con las bandas termales de Landsat. Así, se generaron supuestos cambios de volumen en los glaciares y un supuesto aporte de agua en metros desde los glaciares hasta las masas de agua finales de estas masas de hielo. En este proceso, se tuvo en cuenta el lago Argentino, que conecta al glaciar Upsala a través del brazo Argentino y al GPM a través del canal Los Témpanos, además de calcular el aporte estimado desde el GPM hasta el Brazo Rico.

La delimitación de ambos glaciares generó datos, principalmente de superficie total del glaciar, consistentes con estudios anteriores en la zona. Se observa un retroceso constante del glaciar Upsala, perdiendo cerca del 9% de su superficie total en 25 años, con pérdidas anuales pequeñas pero constantes. En el GPM, también se nota una relación entre los cambios detectados en este estudio y trabajos anteriores, destacándose las variaciones tanto positivas como negativas y la considerable pérdida y retroceso en los últimos 5 años, con una disminución de aproximadamente el 3% en comparación con la máxima superficie durante el período de estudio. En ambos glaciares, se observa una pérdida significativa de superficie después del “Niño Godzilla” de 2015-2016, año que registró una mínima precipitación, la más baja de todo el estudio, y un

aumento de las temperaturas promedio 4 años antes de estas importantes pérdidas.

En cuanto a los cambios de volumen y aporte de agua, además de la pérdida de superficie total del glaciar Upsala, también se constata una disminución en altura y por ende en volumen. Sin embargo, en los intervalos de tiempo de 4 años utilizados para este trabajo, existen años particulares en los que, a diferencia de la norma, el glaciar ganó altura (y volumen) a pesar de la pérdida de superficie total durante esos años (2016-2017). Las variaciones de volumen de las áreas representativas también permiten inferir el comportamiento del glaciar en términos de aporte de agua a las masas de agua en las que desembocan, extrapolando estas áreas representativas a todas las áreas de ablación del glaciar, lo cual es una primera aproximación al aporte total del glaciar a estas masas de agua.

Este trabajo presenta avances significativos en comparación con estudios previos de delimitación de glaciares. Primero, se destaca la mayor extensión temporal abarcando 25 años de cambios, lo que proporciona una delimitación detallada para cada año.

La elección de la zona de estudio es particularmente relevante, ya que se ha detectado una carencia significativa de investigaciones relacionadas con la superficie total y el volumen de los glaciares en esta área. A diferencia de los estudios anteriores que se han centrado principalmente en los frentes de los glaciares.

Una de las contribuciones clave de este trabajo es la introducción de un proceso de delimitación de glaciares consistente y aplicable en cualquier zona. Aunque aún se encuentra en desarrollo, esta herramienta tiene un gran potencial y se espera que, en el futuro, sea optimizada y puesta a disposición en Google Earth Engine, lo que permitirá un acceso más amplio y fácil a esta tecnología.

Comparado con el estudio anterior realizado por Belmar et al. (2019), este trabajo destaca por recrear y mejorar muchos de los procedimientos utilizados. Se han superado las limitaciones previas, incorporando la detección de nubes en los DEMs de ASTER y la detección de debris en las imágenes de Landsat.

Al igual que se presentan avances y ciertas diferencias a trabajos anteriores en el estudio del comportamiento de glaciares, también hay que destacar que en la metodología aplicada existen ciertas limitaciones. Una de estas limitaciones es la robustez de la serie de superficie de glaciares. La variación anual que presenta el glaciar durante este estudio podría dar lugar a una baja representatividad de los cambios que cada glaciar puede experimentar. Con este motivo en mente, se plantea a futuro, investigar una metodología de fusión que nos permita generar una base de datos combinando datos Landsat y ASTER óptico o incluso datos inSAR (incluso a escala mensual). De esta manera, ya no existirían los problemas de nubosidad (Scholte et al., 2003).

Tal como en la delimitación visual, la nubosidad en los DEMs temporales de ASTER en nuestra zona de estudio presenta una limitación, lo que impide obtener la variación total del volumen de los glaciares. Para superar esta limitación, a futuro se sugiere utilizar datos de interferometría y generación de DEMs a partir de estos y modelos físicos para obtener los cambios de volumen de los glaciares.

Además, la zona de estudio tiene poca cobertura de mediciones de variables meteorológicas, con las estaciones más cercanas en el glaciar O'Higgins o El Calafate. Se propone el uso de diferentes modelos atmosféricos y analizar su desempeño en el área de estudio.

En resumen, este estudio ha avanzado significativamente en la delimitación de glaciares, ampliando el periodo de análisis y explorando áreas no tan estudiadas en ciertos ámbitos. Además, se han presentado nuevas herramientas en percepción remota. Estos avances contribuyen al conocimiento y comprensión de los glaciares en la zona de estudio y pueden tener un impacto positivo en futuras investigaciones en esta área.

Bibliografía

- Abrams, M., Crippen, R., and Fujisada, H. (2020). Aster global digital elevation model (gdem) and aster global water body dataset (astwbd). *Remote Sensing*, 12(7).
- Abrams, M. and Hook, S. (2002). *ASTER User Handbook, Pasadena*. EROS Data Center.
- Alley, R. (2011). K.m. cuffey and w.s.b. paterson. 2010. the physics of glaciers. fourth edition. amsterdam, etc., academic press. 704pp. isbn-10: 0-123694-61-2, isbn-13: 978-0-123-69461-4, hardback, £60.99/€71.95/us\$99.95. *Journal of Glaciology*, 57(202):383–384.
- Aniya, M. (1992). Characteristics and variations of upsala and moreno glaciers, southern patagonia. *Bull. Glacier Res.*, 10:39–53.
- Aniya, M., Sato, H., Naruse, R., Skvarca, P., and Casassa, G. (1997). Recent glacier variations in the southern patagonia icefield, south america. *Arctic and Alpine Research*, 29(1):1–12.
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., and Wood, E. F. (2018). Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1).
- Benn, D. and Evans, D. J. A. (2014). *Glaciers and Glaciation, 2nd edition*. Routledge.
- Boisier, J. P., Alvarez-Garretón, C., Cepeda, J., Osses, A., Vásquez, N., and Rondanelli, R. (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, EGU General Assembly Conference Abstracts, page 19739.
- Cai, W., Santoso, A., Wang, G., Yeh, S.-W., An, S.-I., Cobb, K. M., Collins, M., Guilyardi, E., Jin, F.-F., Kug, J.-S., Lengaigne, M., McPhaden, M. J., Takahashi, K., Timmermann, A., Vecchi, G., Watanabe, M., and Wu, L. (2015). ENSO and greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 5(9):849–859.
- Campbell, J. and Wynne, R. (2011). *Introduction to Remote Sensing*.

- Carrasco, J., Casassa, G., and Rivera, A. (2002). *Meteorological and climatological aspects of the Southern Patagonia Ice Cap, América del Sur*, pages 29–41.
- Casassa, G. (1995). Glacier inventory in chile: current status and recent glacier variations. *Annals of Glaciology*, 21:317–322.
- Chavez, Jr, P. (1996). Image-based atmospheric corrections - revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62:1025–1036.
- Chinni, G. A. and Warren, C. R. (2004). The 2004 outburst flood at glaciario perito moreno, argentina. *Journal of Glaciology*, 50(171):615–616.
- Damseaux, A., Fettweis, X., Lambert, M., and Cornet, Y. (2020). Representation of the rain shadow effect in patagonia using an orographic-derived regional climate model. *International Journal of Climatology*, 40(3):1769–1783.
- Daniels, L. D. and Veblen, T. T. (2004). Spatiotemporal influences of climate on altitudinal treeline in northern patagonia. *Ecology*, 85(5):1284–1296.
- Davies, B. J., Golledge, N. R., Glasser, N. F., Carrivick, J. L., Ligtenberg, S. R. M., Barrand, N. E., van den Broeke, M. R., Hambrey, M. J., and Smellie, J. L. (2014). Modelled glacier response to centennial temperature and precipitation trends on the antarctic peninsula. *Nature Climate Change*, 4(11):993–998.
- Deilami, K., Khajeh, S., Bolhassani, N., and Jazireeyan, I. (2012). Application of aster satellite in digital elevation model generation: A review. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 4:1033–1037.
- Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P., and Ruiz, L. (2019). Two decades of glacier mass loss along the andes. *Nature Geoscience*, 12(10):802–808.
- Fernandez, I. and Herrero, E. (2001). El satélite landsat. Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+.
- Fogt, R. L. and Marshall, G. J. (2020). The southern annular mode: Variability, trends, and climate impacts across the southern hemisphere. *WIREs Climate Change*, 11(4):e652.
- Garreaud, R., Lopez, P., Minvielle, M., and Rojas, M. (2013). Large-scale control on the patagonian climate. *Journal of Climate*, 26:215–230.
- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., and Marengo, J. (2009). Present-day south american climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4):180–195.
- Haeberli, W. and Beniston, M. (1998). Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the alps. *Ambio*, 27(4):258–265.
- Hegerl, G. C., Zwiers, F. W., Braconnot, P., Gillett, N., Luo, Y. M., Marengo Orsini, J., Nicholls, N., Penner, J., and Stott, P. (2007). Understanding and Attributing Climate Change. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*.

- Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.*
- Heinsheimer, G. (1958). Zur hydrologie und glaziologie des lago argentino und ventisquero moreno iii. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glaziologie*, 4:61–72.
- Huss, M. and Hock, R. (2015). A new model for global glacier change and sea-level rise. *Frontiers in Earth Science*, 3.
- Ihlen, V. and Zanter, K. (2019). *Landat 8 Science Data User's Handbook*. USGS.
- IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Technical Summary*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.
- Jacques-Coper, M., Veloso-Aguila, D., Segura, C., and Valencia, A. (2021). Intraseasonal teleconnections leading to heat waves in central chile. *International Journal of Climatology*.
- Koppes, M., Hallet, B., Rignot, E., Mouginot, J., Wellner, J. S., and Boldt, K. (2015). Observed latitudinal variations in erosion as a function of glacier dynamics. *Nature*, 526(7571):100–103.
- Kour, R., Patel, N., and Krishna, A. P. (2015). Assessment of relationship between snow cover characteristics (SGI and SCI) and snow cover indices (NDSI and s3). *Earth Science Informatics*, 8(2):317–326.
- Lintz, J. and Simonett, D. S. (1976). Sensors for spacecraft. In *Remote Sensing of Environment*, pages 323–343.
- Martinic, M. (1977). *Centenario de las expediciones del Teniente Juan Tomás Rogers de la Armada de Chile, en la Patagonia Austral, 1877 y 1879*. Anales del Instituto de la Patagonia, 8: 71-79.
- Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Lascano, M. E., Delgado, S., and Stepanek, P. (2008). 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern patagonia. *Global and Planetary Change*, 60(1-2):85–100.
- Moragues, S., Lenzano, M. G., Vecchio, A. L., Falaschi, D., and Lenzano, L. (2017). Velocidades superficiales del glaciér upsala, andes patagónicos sur, mediante el uso de correlación cruzada en imágenes satelitales: periodo 2013-2014. *Andean Geology*, 45(1):87.
- Moran, M., Jackson, R. D., Slater, P. N., and Teillet, P. M. (1992). Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. 41(2-3):169–184.
- Moreno, P. I., Vilanova, I., Villa-Martínez, R., Garreaud, R. D., Rojas, M., and Pol-Holz, R. D. (2014). Southern annular mode-like changes in southwestern

- patagonia at centennial timescales over the last three millennia. *Nature Communications*, 5(1).
- Müller, F. (1962). Zonation in the accumulation area of the glaciers of axel heiberg island, n.w.t., canada. *Journal of Glaciology*, 4(33):302–311.
- Ortiz de Filippi, H. (1991). Problema limítrofe con argentina en la laguna del desierto. *Biblioteca del congreso nacional de Chile*.
- Panchuk, K. (2019). *Pyshical Geogoly First Edition USask*. University of Saskatchewan.
- Paruelo, J. M., Beltrán, A., Jobbágy, E., Sala, O. E., and Golluscio, R. A. (1998). The climate of patagonia: general patterns and controls on biotic processes. *Ecología austral*, 8(02):085–101.
- Rabatel, A., Sirguey, P., Drolon, V., Maisongrande, P., Arnaud, Y., Berthier, E., Davaze, L., Dedieu, J.-P., and Dumont, M. (2017). Annual and seasonal glacier-wide surface mass balance quantified from changes in glacier surface state: A review on existing methods using optical satellite imagery. *Remote Sensing*, 2017.
- Raper, S. C. B. and Braithwaite, R. J. (2009). Glacier volume response time and its links to climate and topography based on a conceptual model of glacier hypsometry. *The Cryosphere*, 3(2):183–194.
- Rivera, A., Bown, F., Muñoz, C., Napoleoni, F., and Vuille, M. (2016). Balance de masa glaciar. (65):239–241.
- Rogers, J. (1880). “*Segunda exploración de la parte austral de la Patagonia*”. Anuario Hidrográfico de la Marina de Chile. Tomo VI: 97-150.
- Sakakibara, D. and Sugiyama, S. (2014). Ice-front variations and speed changes of calving glaciers in the southern patagonia icefield from 1984 to 2011. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(11):2541–2554.
- Schneider, C. and Gies, D. (2004). Effects of el niño–southern oscillation on southernmost south america precipitation at 53°s revealed from NCEP–NCAR reanalyses and weather station data. *International Journal of Climatology*, 24(9):1057–1076.
- Scholte, K., Hommels, A., Van der Meer, F., Kroonenberg, S., Hanssen, R., Aliyeva, E., Huseynov, D., and Guliev, I. (2003). Preliminary aster and insar imagery combination for mud volcano dynamics, azerbaijan. In *3rd EARSel Workshop on Imaging Spectroscopy, Herrsching*, pages 13–16.
- Skvarca, P. (2002). Importancia de los glaciares del hielo patagónico sur para el desarrollo regional. *El Calafate*, 5:785–798.
- Sobrino, J., Jimenez-Munoz, J.-C., and Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from landsat tm 5. *Remote Sensing of Environment*, 90:434–440.

- Stuefer, M., Rott, H., and Skvarca, P. (2007). Glaciar perito moreno, patagonia: climate sensitivities and glacier characteristics preceding the 2003/04 and 2005/06 damming events. *Journal of Glaciology*, 53(180):3–16.
- Tamburini Beliveau, G. and Reato, A. (2023). Statement: Sudden retreat of the perito moreno glacier in the period 2018 (2022) - 2023.
- Taschner, S. and Ranzi, R. (2002). Comparing the opportunities of landsat-tm and aster data for monitoring a debris covered glacier in the italian alps within the glims project. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, volume 2, pages 1044–1046 vol.2.
- Wang, C., Deser, C., Yu, J.-Y., DiNezio, P., and Clement, A. (2016). El niño and southern oscillation (ENSO): A review. In *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific*, pages 85–106. Springer Netherlands.