

2DA ENTREGA LICITACIÓN 13/05/2024

Informe Final

“Estudio de Dinámica Glacial”

Licitación

ID: 2735 - 371 - LE23

MAYO 2024



AgroSpace

Tabla de Contenido

| | |
|---|----|
| 1. Resumen técnico..... | 3 |
| 2. Área de estudio..... | 3 |
| 3. Metodología de revisión de datos y generación de la base de datos..... | 5 |
| 3.1. Dinámica Glaciar..... | 5 |
| 3.1.1. Delimitación de área glaciar..... | 5 |
| 3.1.2. Tasas de variación..... | 6 |
| 3.2. Carta Geomorfológica..... | 6 |
| 4. Resultados..... | 7 |
| 4.1. Delimitación espacial y temporal del área glaciar..... | 7 |
| 4.2. Tasas de variación decadal por glaciar..... | 10 |
| 4.2. Carta Geomorfológica..... | 11 |
| 5. Comentarios Finales..... | 14 |
| 6. Bibliografía..... | 15 |
| 7. Apéndices..... | 16 |
| Apéndice 1. Acceso a repositorio de datos..... | 16 |
| Apéndice 2. Disponibilidad de imágenes en base de datos desarrollada..... | 17 |
| Apéndice 2 es la superficie de glaciares..... | 18 |

1. Resumen técnico

Este informe corresponde a la licitación ID 2735 - 371 - LE23, el cual analiza los 121 glaciares rocosos, 3 Glaciares cubiertos y 6 Glaciares descubiertos de la comuna de Lo Barnechea desde 1986 hasta 2023 utilizando imágenes satelitales. Las superficies glaciares fueron analizadas mediante índices de nieve e interpretación visual. Los hallazgos se contrastaron adicionalmente con los datos del Inventario de Glaciares (IPG2022), realizado por la Dirección General de Aguas (DGA).

Entre los glaciares analizados, el Cerro El Plomo y el Glaciar Paloma Oeste mostraron los mayores índices de retroceso, con reducciones del 65% y 54%, respectivamente. A lo largo del período estudiado, se observó que ciertos cuerpos de hielo previamente no clasificados como glaciares en 1986, ahora son reconocidos como tales por la DGA, lo que indica un fraccionamiento significativo de estos cuerpos de hielo. Adicionalmente, se identificó que varios glaciares, anteriormente caracterizados por tener hielos superficiales, ahora están completamente recubiertos por detritos. Este fenómeno complica la caracterización de los glaciares mediante teledetección, ya que el retroceso glaciar parece haber fomentado la acumulación de material piroclástico sobre el hielo.

Es crucial destacar que la proximidad a fuentes antropogénicas podrían estar contaminando algunos glaciares con *black carbon* o polvo en suspensión. Basado en estos hallazgos, el informe recomienda la implementación de estrategias específicas para el monitoreo de este tipo de contaminación en los glaciares. Finalmente, en el actual contexto del calentamiento global, es fundamental realizar un monitoreo de los glaciares con el fin de establecer una línea base sobre la delimitación y la proyección sobre los cambios futuros mediante tendencias de retroceso. Esto es fundamental para la seguridad hídrica de un valle y para la toma de decisiones con el fin de establecer programas de eficiencia hídrica.

2. Área de estudio

La comuna de Lo Barnechea alberga 130 glaciares dentro de su territorio, según se detalla en el Inventario de Glaciares (IG 2022) realizado por la Dirección General de Aguas (DGA). Estos glaciares se distribuyen principalmente en las sub-subcuencas "Río Molina", "Río San Francisco" y "Río Mapocho entre Río San Francisco y Bajo Junta Estero Arrayán". Los glaciares comprendidos en la comuna cubren una superficie total de 24,7 km² y poseen aproximadamente 0,38 km³ de volumen de hielo (convertido a equivalente en agua). En la Figura 1, presente a continuación, se ilustra la ubicación y distribución de los glaciares dentro del territorio. La mayoría de estos cuerpos de hielo han sido renombrados en el IGP 2022 y sus características han sido actualizadas para reflejar cambios a categorías como glaciares cubiertos, glaciaretes o incluso la asignación de toponimias a nuevos glaciares identificados. En el caso de la sub subcuenca río Molina esto se ve reflejado en el Glaciar S/N antes clasificado como glaciarete, o la clasificación de un nuevo Glaciarete S/N que antes formaba parte del glaciar Cerro el Plomo, que por causa de las condiciones orográficas se fue fragmentando siendo ahora un cuerpo de hielo independiente.

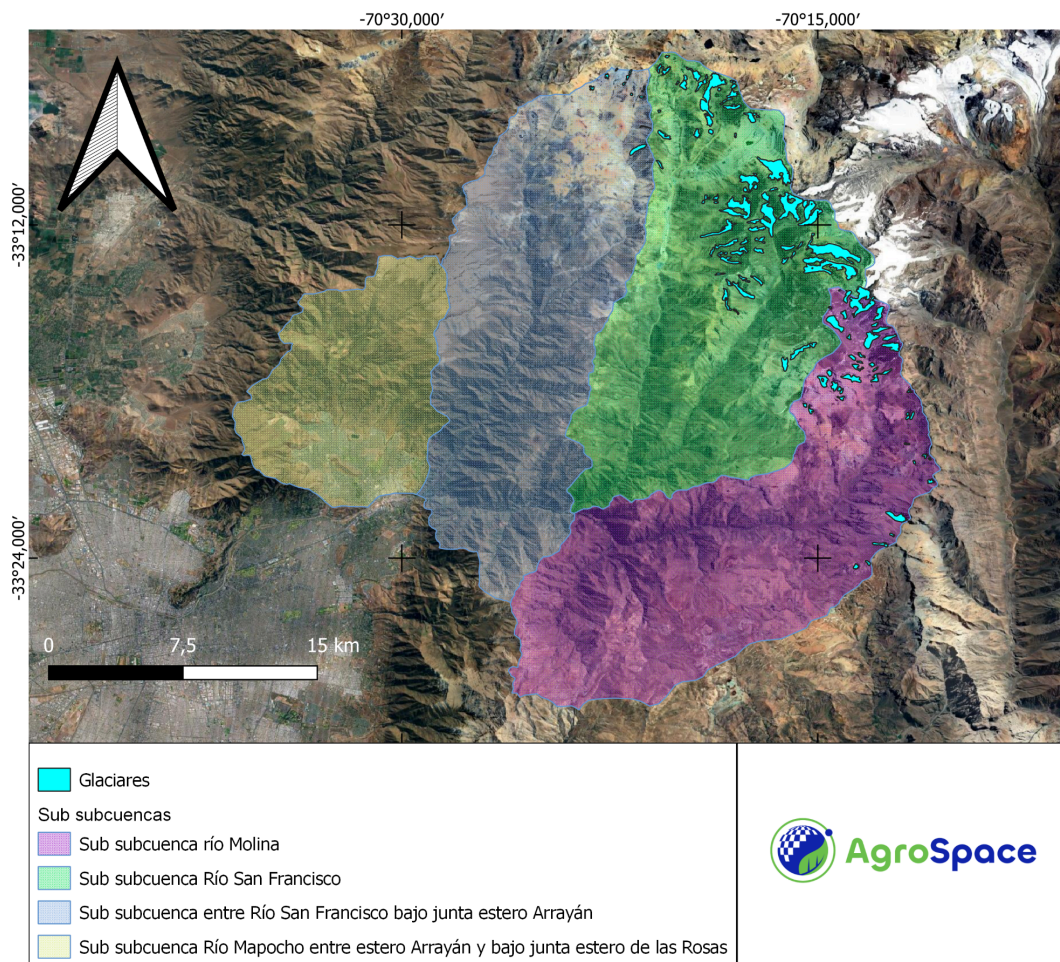


Figura 1. Mapa de distribución de glaciares de la comuna de Lo Barnechea. En color se muestran las subcuencas de los ríos Molina, San Francisco y río Mapocho entre el estero Arrayán y bajo junta estero de las Rosas.

3. Metodología de revisión de datos y generación de la base de datos

3.1. Dinámica Glaciar

Para el estudio de dinámica glaciar se analizaron los glaciares descubiertos de la comuna de Lo Barnechea utilizando la serie histórica de imágenes Landsat correspondientes a los satélites Landsat 5-™ Landsat -7 ETM, Sentinel 2a y Sentinel 2b. La resolución espacial de cada satélite varía entre 30x30 m (Landsat 5) a 10 x 10 m (Sentinel 2). Cada imagen satelital fue seleccionada bajo el criterio de máxima representatividad sobre el área de estudio cuya superficie no fuese menor a un 90%, permitiendo la visualización de todos los glaciares de la comuna.

Por otra parte, las imágenes fueron filtradas por los años donde había imágenes satelitales disponibles y cuyo porcentaje de nubes no fuese superior al 10% con el fin de realizar una máscara de las zonas que serían afectadas por la nubosidad. Una vez generada y consolidada esta información (Apéndice I), se procedió aplicando diferentes métodos y algoritmos para la delimitación glaciar.

3.1.1. Delimitación glaciares descubiertos

Para la delimitación glaciar se utilizaron la reflectancia superficial, empleando imágenes satelitales de Sentinel-2 (<https://dataspace.copernicus.eu/>), la constelación Landsat (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) y el agregado de productos satelitales HLS (<https://hls.gsfc.nasa.gov/>). Los datos de reflectancia de la superficie se procesaron utilizando los productos oficiales a nivel 2A (L2A): sen2cor para Sentinel-2, LaSRC para Landsat 8-9 y HLS, y LEDAPS para las misiones de legado Landsat 5 y 7. Con el objetivo de minimizar el impacto de la cobertura nubosa en el análisis y aumentar la precisión en la estimación de la superficie nevada, se aplicaron máscaras de nubes utilizando el producto Cloud Score de Google para Sentinel-2, y *Fmask* para Landsat y HLS.

Dentro los índices más utilizados para la diferenciación de hielo, glaciar y nieve se encuentran el Normalized Difference Snow Index (NDWI), el Normalized Difference Snow Ice Index (NDSII) y el Normalized Difference Glacier Index (NDGI) (Keshri et al (2009). Sin embargo, estos índices normalmente se aplican en su conjunto y están diseñados para análisis supraglaciares ya que se utilizan diferentes rangos del espectro electromagnético que pueden ser contrastados con medidas in-situ. El NDSI utiliza el rango espectral del verde y el infrarrojo de onda corta, el NDSII el rango espectral del verde y el rojo, finalmente el NDGI utiliza el rango espectral del verde y el rojo. Estudios comparativos en Chile muestran su aplicación para estudios en la superficie supraglaciar (Florath et al., 2022). El uso combinado de estos tres índices permite una caracterización de diferentes formas dentro del glaciar, aún cuando es limitando para neviza o nieve fresca.

Este informe presenta una diferenciación con imágenes satelitales adquiridas principalmente en verano, sin cobertura nubosa, sin cobertura de nieve circundante y cuyo objetivo principal se centra en la delimitación de la superficie glaciar. Por lo tanto, se seleccionó el NDSI debido a que las condiciones para realizar este informe son muy similares al uso de este índice de delimitación de glaciares utilizado en trabajos previos (Raup et al., 2007; Paul et al., 2015; Zhan et al., 2021). Los trabajos anteriores muestran la utilidad del NDSI en la clasificación de glaciares siempre y cuando se aplique un umbral de

confianza para la identificación del hielo, el cual puede variar según la ubicación del glaciar, nieve circundante, entre otros factores.

La metodología se basa en el Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI) para identificar áreas cubiertas de nieve, estableciendo un umbral de 0,4 para la clasificación de superficies de nieve o hielo (Hall et al. 1995; Hall et al., 1998; Burns and Nolin, 2004; Durán-Alarcón et al., 2015), tal como se muestra en la Ecuación 1. Dado que la nieve presenta alta reflectancia en el espectro visible y significativa absorción en el infrarrojo cercano/medio, el NDSI se calcula usando las bandas del verde (GREEN, 0,52 - 0,60 μm) y el infrarrojo medio (SWIR, 1,55 - 1,75 μm):

$$NDSI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR} \quad (\text{Ec. 1})$$

Los resultados obtenidos del NDSI no son exactos en la delimitación automática de glaciares descubiertos precisamente porque en el área de estudio (zona montañosa) este índice puede confundir las zonas delimitadas con zonas de sombra (Wang et al., 2017). Es por esto que la delimitación de glaciares descubiertos se complementa con delimitación manual en base a composiciones RGB (SWIR2 - NIR - GREEN). Con el objetivo de identificar el hielo glaciar, se seleccionaron imágenes de los meses al final de la temporada de deshielo (febrero, marzo o inicios de abril), ya que es en esta época donde termina la temporada de derretimiento de nieve. Este análisis se realizó sobre imágenes del período comprendido entre 1986 y 2023, con el fin de estudiar la dinámica glaciar. Para prevenir la clasificación errónea de nieve estacional como hielo permanente, se efectuó la delimitación utilizando imágenes de años consecutivos.

3.1.2. Tasas de variación

Una vez delimitado los glaciares para cada año de estudio se calcularon tasas de variación (Ecuación 2) entre años de estudio con el fin de analizar temporalmente los cambios en la superficie de los glaciares.

$$Tasa\ de\ variación = 100 * \left[\left(\frac{S_{t+i}}{S_t} \right) - 1 \right] \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde S_t y S_{t+i} son las superficies glaciares (ha/añual) de una escena actual y posterior entre un número "i" años, respectivamente.

3.1.3. Delimitación glaciares rocosos

Para la delimitación de glaciares rocosos se tomó como base el Inventario Público de Glaciares de 2022 e imágenes del Programa Google Earth Pro. La identificación de este tipo de glaciares fue a través de los polígonos clasificados como "Glaciar Rcoso" del IPG 2022 y su delimitación se hizo a través de reconocimiento visual identificando la forma lobulada de estos, las crestas y surcos, e incluyendo el talud de avance frontal y lateral en la delimitación.

3.2. Carta Geomorfológica

Para esta sección se identificaron las principales geoformas glaciares y periglaciares presentes en el territorio comunal mediante fotointerpretación, los actuales resultados correspondiente a las cartografías de glaciares, base de datos geomorfológica del Mapa Geológico Nacional en escala

1:1.000.000 elaborado por Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin) y revisión bibliográfica (Valenzuela, 2020; Herrera-Ossandón et al., 2023). Es importante destacar que las lagunas fueron caracterizadas en las cartografías donde se podrían apreciar según la resolución especial de las imágenes. Estas lagunas fueron cambiando según la distribución y estacionalidad.

4. Resultados

4.1. Delimitación espacial y temporal de glaciares descubiertos

4.1.1. Sub subcuenca río San Francisco

En la Figura 2 se puede observar la fragmentación que han tenido los glaciares descubiertos en la sub subcuenca río San Francisco.

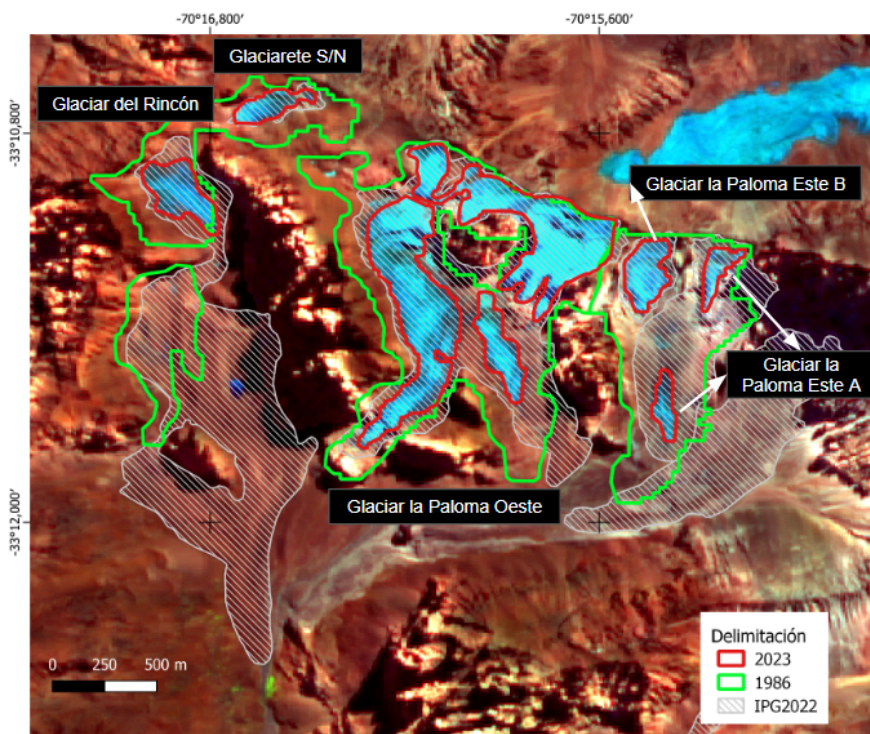


Figura 2. Glaciares descubiertos en la sub-subcuenca río San Francisco entre 1986-2023 y su comparación con la delimitación del IPG 2022.

Dada la delimitación realizada en el IPG 2022, lo que se ha fragmentado es la parte descubierta de los glaciares, ya que no se puede descartar la presencia de hielo cubierto entre las zonas delimitadas sin tener una validación de terreno. A su vez, por la delimitación de 1986 se puede observar cierta continuidad entre el Glaciarete S/N y el Glaciar del Rincón, pero actualmente se encuentran clasificados como dos cuerpos de hielo distintos. En base a la delimitaciones realizadas dicha fragmentación ocurrió luego del retroceso del año 2018. Mismo escenario es observable en el Glaciar la Paloma, en el caso de su parte Oeste la clasificación actual del IPG 2022 lo delimita completamente como un solo cuerpo de

hielo, mientras que su parte Este se encuentra fragmentado en dos cuerpos A y B. Además, el Glaciar Altar Sur se encuentra totalmente cubierto por detritos.

Por otra parte, la fragmentación de glaciares sale descrita en el Inventario Público en el momento en que se le asigna un código al glaciar (Tabla 1). El último dígito del código es el “Carácter de indicación de fragmentación”; donde: “@” es un glaciar no fragmentado, y en el caso de glaciares fragmentados se le asigna una “A” para el cuerpo de mayor tamaño y una “B” al segundo cuerpo de mayor superficie.

Tabla 1. Código designado por la DGA de los glaciares descubiertos en la sub subcuenca río San Francisco.

| ID | Glaciar | CÓDIGO DGA |
|----|--------------------------|--------------|
| 1 | Glaciar la Paloma Oeste | CL105721064@ |
| 2 | Glaciar la Paloma Este B | CL105721065B |
| | Glaciar la Paloma Este A | CL105721065A |
| 3 | Glaciar del Rincón | CL105721061@ |
| | Glaciarete S/N | CL105721063@ |

En la Tabla 1 se muestra que el Glaciar del Rincón, el Glaciarete S/N y el Glaciar la Paloma Oeste no se encuentran fragmentados según esta clasificación. Mientras que el Glaciar la Paloma Este A y B sí se encuentra clasificado como glaciar fragmentado. La figura 3 muestra la tendencia de la superficie glaciar para los glaciares descubiertos de la sub-subcuenca del río San Francisco, experimentando importantes disminuciones en la última década para el Glaciar paloma (este y Oeste) y el Glaciar del Rincón (en promedio, cercano al 50%).

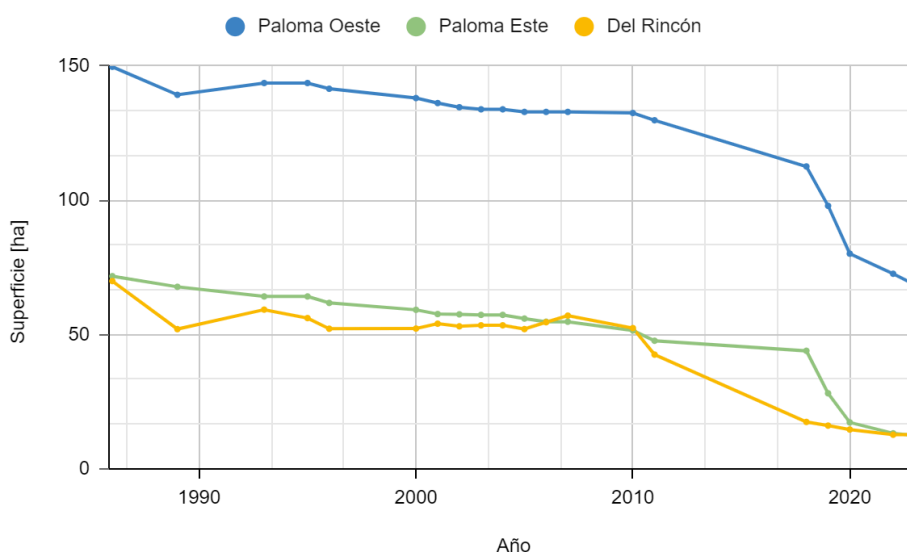


Figura 3. Superficie de glaciar descubierta localizada en la sub-subcuenca río San Francisco entre 1986-2023.

4.1.2. Sub subcuenca río Molina

En la Figura 4 se muestran los cambios que han tenido los glaciares descubiertos de la sub subcuenca río Molina.

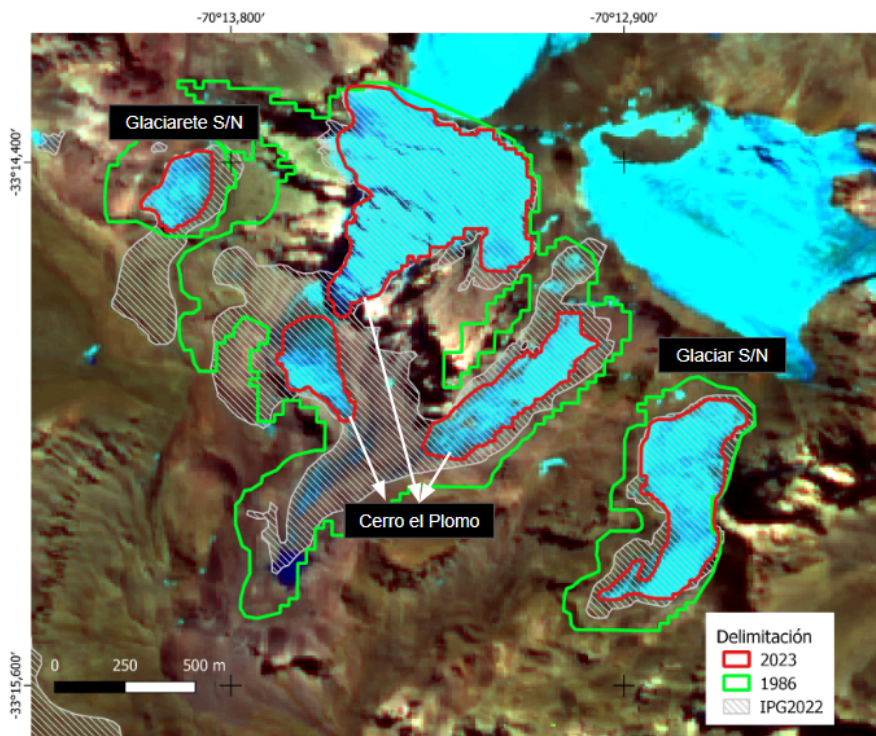


Figura 4. Glaciares descubiertos en la sub-subcuenca río Molina entre 1986-2023 y su comparación con la delimitación del IPG 2022.

Al igual que en los glaciares de la sub subcuenca estero Yerba Loca se puede observar una fragmentación del hielo descubierto de los glaciares. En el caso del Glaciar Cerro Plomo esta separación es evidente e incluso por la delimitación de 1986 había una continuidad con el Glaciarete S/N, pero que al igual que en el caso del Glaciar el Rincón, actualmente se encuentran clasificados como dos cuerpos de hielo distintos, por lo que en esta caso se descarta la presencia de hielo cubierto entre estos. Esta fragmentación se puede ver corroborada por el IPG 2022 en la Tabla 2. Esta tabla muestra que según el código asignado en el IPG 2022 el Glaciar Cerro el Plomo y ambos Glaciares S/N no se encuentran fragmentados, mientras que el Glaciarete S/N sí clasifica como fragmentado.

Tabla 2. Código designado por la DGA de los glaciares descubiertos en la sub-subcuenca río Molina.

| ID | Glaciar | CÓDIGO DGA |
|----|------------------------|--------------|
| 4 | Glaciar Cerro el Plomo | CL105720013@ |
| 5 | Glaciar S/N | CL105720014@ |
| 6 | Glaciarete S/N | CL105720011A |

En la Figura 5 se puede observar la variación de superficie de los glaciares descubiertos de la comuna de Lo Barnechea. Todos los glaciares tienen una disminución acentuándose en los últimos 5 años. Sin embargo, el glaciar Cerro el Plomo, presentó una disminución del 54%. El Glaciar Paloma, también presenta una brusca disminución desde el 2016 a la fecha así como el glaciar del Rincón, que desde 2010 ha experimentado una disminución paulatina. Estos últimos con una superficie actual menor a 30 ha.

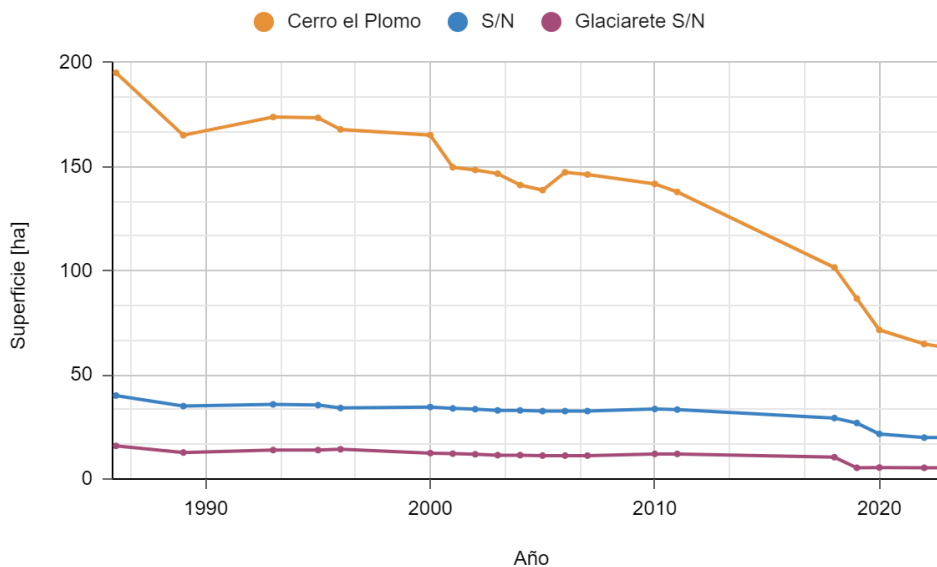


Figura 5. Superficie de glaciar descubierta localizada en la sub-subcuenca río Molina entre 1986-2023.

A nivel de cuenca se ha perdido un total de 360,5 ha de superficie glaciar descubierta entre el período 1986-2023 lo que significa un retroceso de un 54,2%. En anexo II, se muestra la superficie glaciar anual. Estos resultados muestran una disminución significativa ($p > 0,05$) analizando la tendencia negativa de la última década. Estos resultados proyectan una pérdida de superficie glaciar que amerita un monitoreo continuo debido al escaso hielo glaciar que actualmente existe en la comuna de Lo Barnechea.

4.2. Tasas de variación decadal por glaciar

En la Tabla 3 se puede visualizar las variaciones porcentuales decadales y cada cinco años por superficie glaciar. Los glaciares Paloma (oeste y este) y Cerro el Plomo, muestran una tendencia negativa desde el año 1986 a la fecha, siendo más acentuada en el periodo 2018 - 2023. Por otra parte, los glaciares S/N y del Rincón, también experimentaron una fuerte disminución desde el año 2006 a la fecha, con tasas superiores al 20% en promedio para ambos glaciares. Esto puede ser atribuido al efecto de la mega-sequía donde los montos de precipitación sólida en alta montaña presentaron una disminución importante así como una elevación de la línea de nieve (Young, 2023; Aranda et al., 2023).

Tabla 3. Tasas de variación (%) superficie glaciares descubiertos entre 1986-2023.

| Glaciar | Tasas de variación (%) | | | | | |
|----------------|------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| | 1986-1996 | 1996-2002 | 2002-2006 | 2006-2011 | 2011-2018 | 2018-2023 |
| Paloma Oeste | -5,46 | -4,87 | -1,29 | -2,34 | -13,25 | -39,10 |
| Paloma Este | -13,90 | -6,88 | -4,78 | -12,92 | -7,84 | -71,77 |
| Del Rincón | -25,37 | 1,71 | 2,88 | -22,09 | -58,93 | -27,25 |
| Cerro el Plomo | -13,95 | -11,59 | -0,78 | -6,40 | -26,31 | -37,93 |
| S/N | -14,95 | -1,67 | -2,75 | 2,24 | -12,18 | -32,13 |
| Glaciarete S/N | -10,26 | -16,87 | -5,20 | 7,12 | -13,13 | -48,71 |
| TOTAL | -13,04 | -6,93 | -1,29 | -6,95 | -47,00 | -14,86 |

La inexistencia de estaciones de monitoreo para la estimación del tamaño de partículas como disdrómetros, no permite establecer si hubo algún efecto en la intensidad de las nevadas o si estas fueron afectadas por algún factor antrópico como el polvo en suspensión u otro. Algunos autores señalan algún grado de correlación entre nieve húmeda o seca según el tipo de precipitación (Shen et al. 2022). En parte, las partículas en suspensión pueden favorecer los procesos de coalescencia y evita la consolidación de copos de nieve de alta persistencia con el fin de fomentar el proceso de generación de hielo glaciar. Por lo tanto, una alta temperatura disminuye la permanencia de la nieve sobre el glaciar, evitando una disminución de su temperatura superficial y por ende, generando un aumento de actividad en la zona de ablación para evidenciar un posterior retroceso.

Las tasas de variación positivas (Figura 6) obtenidas en el período de estudio coinciden con otros estudios realizados en los Andes Centrales, donde en el período de 2001-2008 se registraron tasas de cambio estables y positivas, y luego en el período entre 2009-2017 tasas de cambio con valores mucho más negativos (Dussailant et al., 2019).

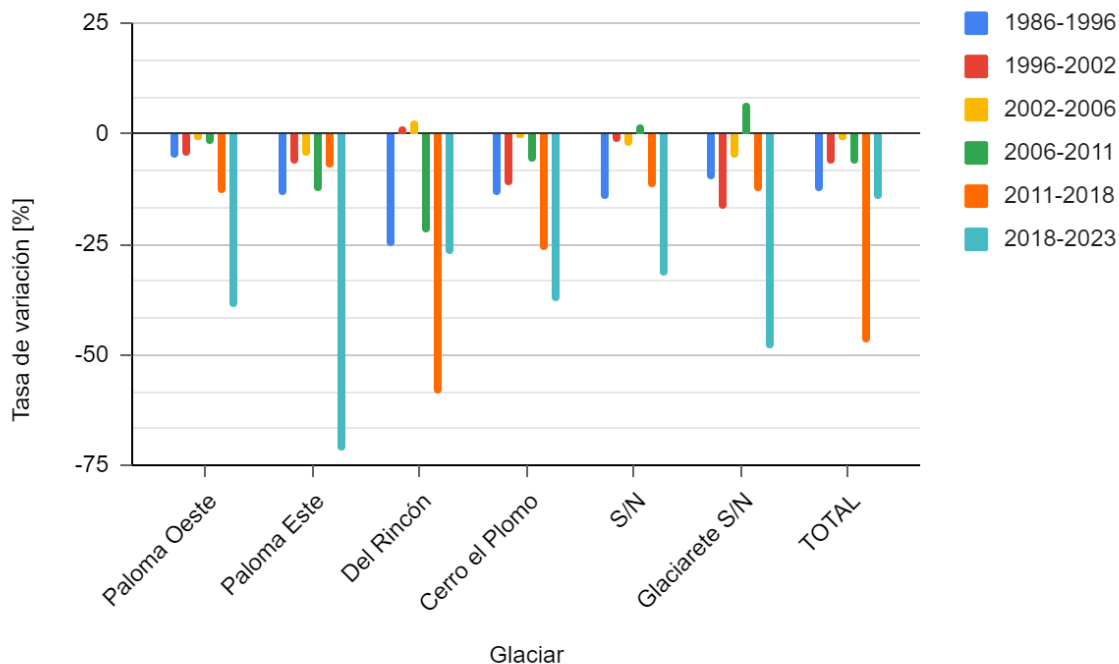


Figura 6. Tasas de variación (%) superficie glaciares descubiertos entre 1986-2023.

4.2. Glaciares rocosos

A nivel de cuenca las geoformas glaciares más dominantes son los glaciares rocosos. En la figura 7 se puede visualizar su alta presencia en la zona de estudio; detallando 38 de estos glaciares en la sub subcuenca del río Molina, 71 en la sub subcuenca del río San Francisco y 12 en la sub subcuenca del tramo bajo del río San Francisco, cerca del estero El Arrayán. A nivel de cuenca las geoformas glaciares más dominantes son los glaciares rocosos.

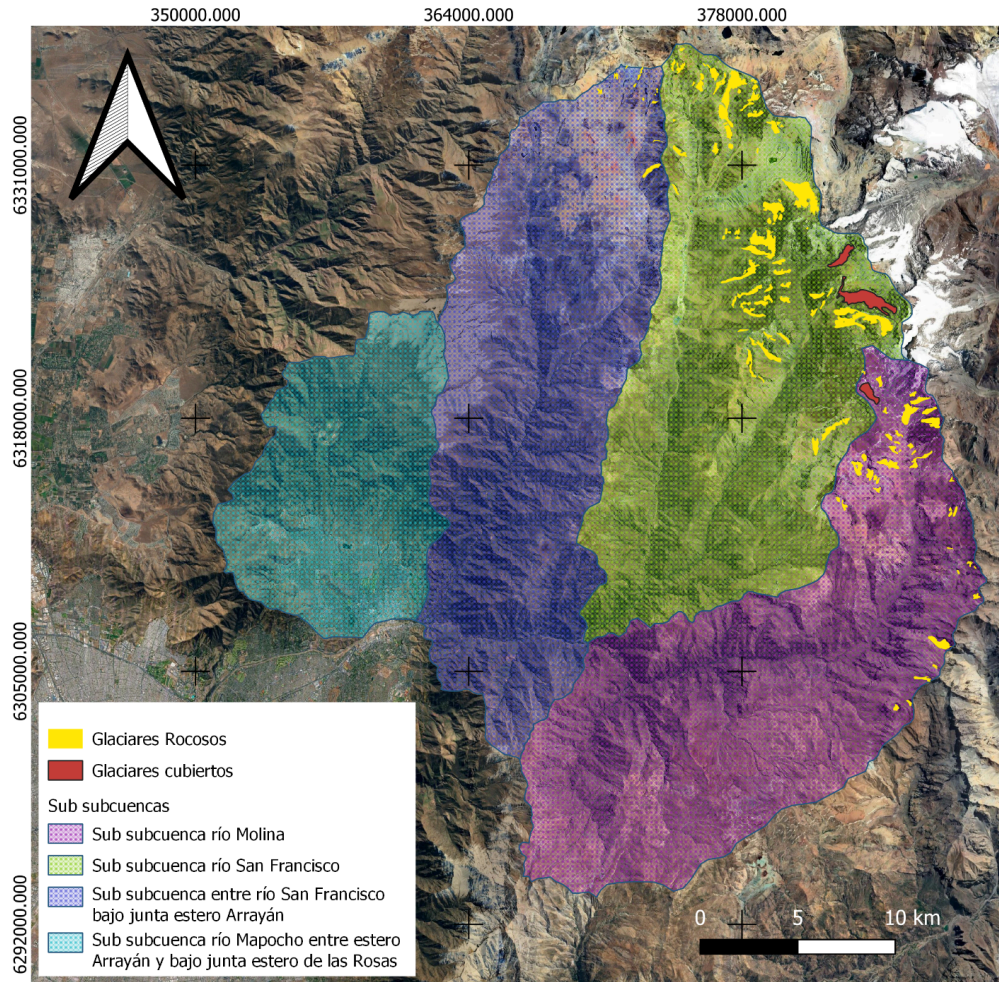


Figura 7. Glaciares rocosos y cubiertos en la comuna de Lo Barnechea.

Tabla 4. Glaciares rocosos en la comuna de Lo Barnechea en base al IPG 2022 y delimitaciones actuales.

| | Sub subcuenca río Molina | Sub subcuenca río San Francisco | Sub subcuenca entre río San Francisco bajo junta estero el Arrayán |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|--|
| Número de glaciares de roca | 38 | 71 | 12 |
| Área promedio [ha] | 10,49 | 17,71 | 4,12 |
| Área mínima [ha] | 1,25 | 1,01 | 0,58 |
| Área máxima [ha] | 46,2 | 172,61 | 21,02 |
| Superficie total [ha] | 398,68 | 1257,52 | 49,47 |

Durante este informe se realizó una delimitación de los glaciares rocosos, la sub subcuenca con mayor presencia de glaciares rocosos es la del río San Francisco, en la cual se encontraron glaciares desde 1,01 ha hasta 172,61 ha. Los dos glaciares de mayor tamaño y los dos únicos con nombre se encuentran en

esta sub subcuenca, el glaciar rocoso Piedra Carvajal de 172,61 ha y el glaciar Infiernillo de 146,25 ha. Le sigue la sub subcuenca del río Molina que tiene glaciares rocosos desde 1,25 ha y un glaciar que alcanza las 46,20 ha, teniendo un total de 398,68 ha de superficie de glaciares rocosos, cifra que es considerablemente menor a la de la sub subcuenca del río San Francisco. Por último, la sub subcuenca entre río San Francisco bajo junta estero el Arrayán es la que tiene la menor cantidad de glaciares rocosos, donde el de mayor tamaño alcanza solo 21,02 ha hectáreas de superficie, y con un promedio de 4,12 ha.

Es importante mencionar que en la sub-subcuenca río San Francisco ha existido pérdida de superficie de glaciares rocosos debido a las actividades de la mina Los Bronces (Brenning, 2008). Según el estudio de Brenning y Azócar (2010) hasta 1997 se registró una pérdida de 20 ha por crecimiento del rajo de la mina, 40 ha por construcción de infraestructura (principalmente caminos) y 20 ha por deposición de lastre.

Por otro lado, en la zona de estudio se identificaron tres glaciares cubiertos. El Glaciar Altar Sur y un glaciar sin nombre en la sub subcuenca del río San Francisco (ambos clasificados en el IPG 2022 como glaciares de valle), y otro glaciar sin nombre en la sub subcuenca del río Molina (clasificado como glaciar de montaña). Cabe señalar que el IPG no distingue entre glaciares de montaña descubiertos y cubiertos, lo mismo ocurre para los glaciares de valle, por lo que se asume que al no detectar hielo descubierto se trata de glaciares totalmente cubiertos. En el caso del Glaciar del Rincón al detectar hielo glaciar solo se analizó su parte descubierta.

4.3. Carta Geomorfológica

En la Figura 8 se presenta el mapa geomorfológico de la comuna de Lo Barnechea en la cual se identificaron las principales clasificaciones determinadas por el SERNAGEOMIN (2003). En conjunto con las delimitaciones de glaciares descubiertos, cubiertos y rocosos. Además se identificaron lagunas glaciares, thermokarst y circos glaciares en base al estudio realizado por Valenzuela (2020) en la cuenca del estero Yerba Loca (parte de la actual sub subcuenca río San Francisco).

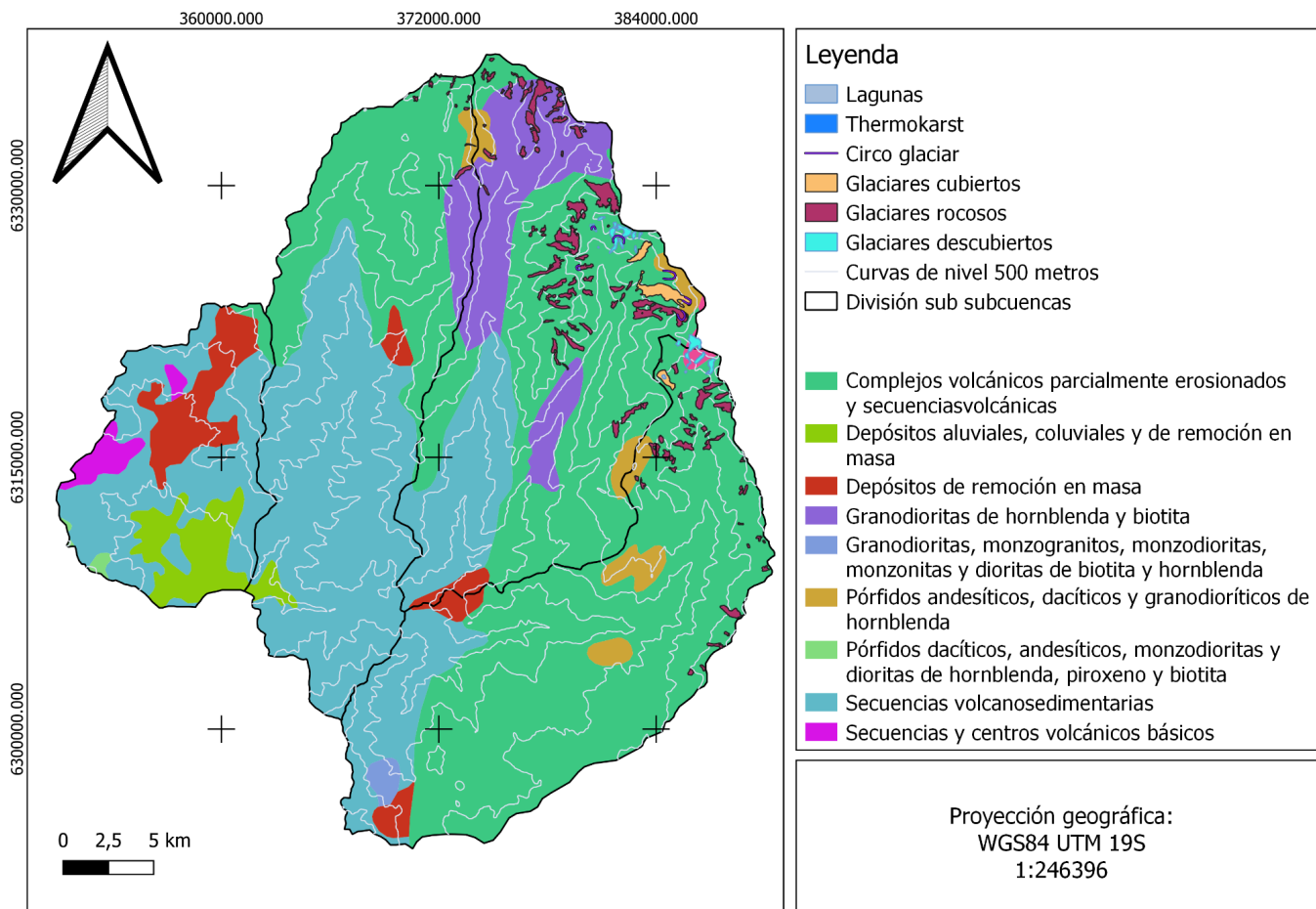


Figura 8. Mapa geomorfológico de la comuna de Lo Barnechea.

Dentro de las principales geoformas asociadas a glaciares se encontraron lagunas glaciares y thermokarst. Las lagunas glaciares corresponden a cuerpos de agua originados por el derretimiento de un glaciar (principalmente glaciares descubiertos). Por otro lado, los thermokarst se originan a partir del derretimiento de permafrost. En la Figura 9 y 10 se destacan las lagunas glaciares y thermokarst como elementos representativos a escala glaciar. No se han detectado lahares ni otras formaciones geomorfológicas relevantes en estas áreas. En la Figura 6 se puede apreciar los cambios y crecimientos de un thermokarst identificado en la parte cubierta del Glaciar del Rincón y la laguna del Glaciar Cerro el Plomo (Laguna Agostini).

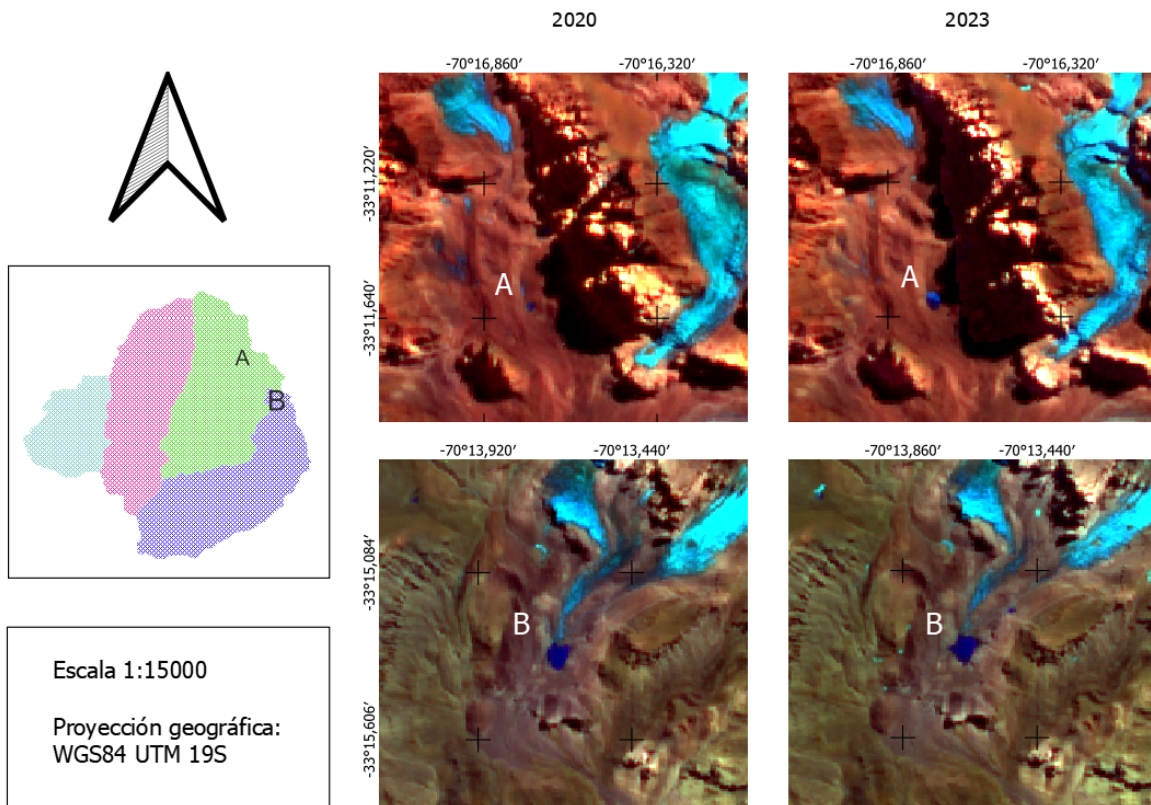


Figura 9. Cambios en Thermokarst para Glaciar del rincón (A) y Laguna Agostini en Glaciar Cerro el Plomo (B) entre 2020 y 2023.

Otro lago glacial detectado es la "Laguna congelada" identificada con una C en la Figura 10. Esta se encuentra en la sub subcuenca del río Molina y según el IPG 2022 está en un glaciar de montaña que actualmente se encuentra completamente cubierto de detritos; sin embargo, según el IPG 2014 estaba clasificado como un glaciar rocoso. Debido a que no se pudo obtener validación en terreno, no es posible determinar si realmente se trata de una laguna glaciar o thermokarst, ya que se tiene dos clasificaciones distintas en su glaciar asociado.

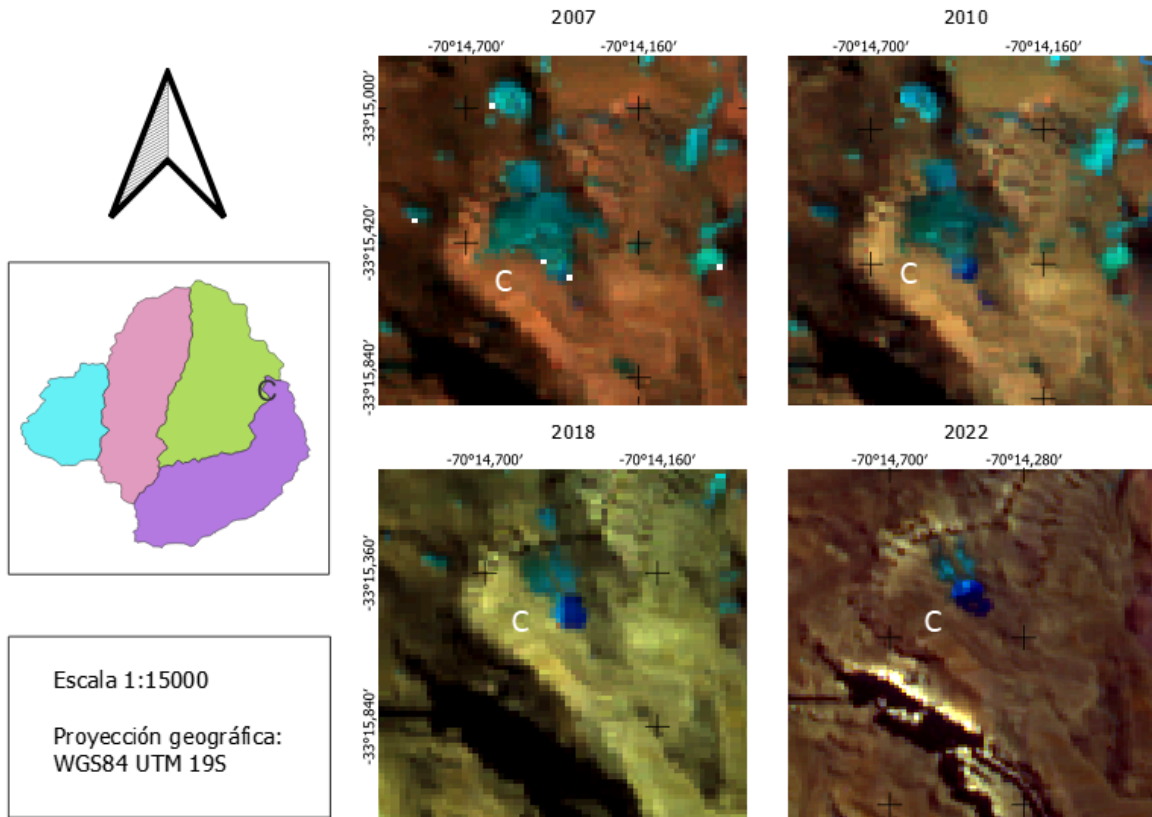


Figura 10. Cambio en "Laguna congelada" entre 2007, 2010, 2018 y 2022.

5. Comentarios Finales

Este diagnóstico técnico se basa en un exhaustivo análisis de las imágenes satelitales disponibles desde 1986 hasta noviembre de 2023 sobre los 121 glaciares rocosos, 3 Glaciares cubiertos y 6 Glaciares descubiertos localizados en la comuna de Lo Barnechea. Los glaciares Paloma Este y Oeste, Del Rincón, El Plomo, y los Glaciaretos S/N han sufrido una disminución en su superficie destacándose el Glaciar Cerro El Plomo con un retroceso del 64% y el Glaciar Paloma Oeste con un 54%.

La metodología utilizada se fundamenta en el uso del NDSI como herramienta digital para la delimitación de glaciares. Aún cuando existen diversos y nuevos índices para la clasificación de glaciares como el Advanced-NDSI (Mohammadi et al., 2023), las mejores son relativas y no significativas (<4%). De hecho, la utilización del NDSI y otros índices complementarios dependerá del tipo de umbral, las características geomorfológicas del glaciar (i.e. superficie circundante) y la estacionalidad. En caso de realizar clasificaciones durante los meses invernales, es necesario complementar el NDSI con otros índices para análisis supraglaciar.

Por otra parte, el Inventario de Glaciares Públicos (IGP) 2022 introduce actualizaciones en la delimitación de los glaciares, redefiniendo superficies y renombrando ciertas formaciones como glaciaretos. La mayor parte de estos glaciares están clasificados como cubiertos. Para un análisis más detallado y monitoreo de estas formaciones es recomendable un monitoreo con imágenes satelitales de muy alta resolución o vuelos de drones, así como también visitas a terreno para el análisis in-situ de su existencia y tendencia. Este informe presenta una carta geomorfológica la cual fue elaborada mediante la recopilación bibliográfica, cartografías previas y la superficie actualizada de los glaciares. Sin embargo, esta cartografía debe ser validada con visitas a terreno para corroborar los límites actuales correspondientes a las formaciones de hielo bajo detritos.

Es importante señalar que la proximidad de los glaciares a zonas antropogénicas, cuya emisión de partículas como polvo en suspensión, carbono negro y otras contaminantes puede alterar la albedo del glaciar, impactando negativamente su balance energético. En particular, los glaciares Paloma y Del Rincón han visto incrementada su capa de detritos en la última década. Anteriormente, la cobertura glaciar era visible durante los periodos estivales mediante observación directa y el uso del Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI). Actualmente, durante estas mismas temporadas, predominan los detritos superficiales, lo cual podría indicar una pérdida de volumen de hielo y un incremento en la cobertura de detritos por las pendientes y materiales circundantes.

En el actual contexto del cambio climático, es de vital importancia realizar un seguimiento continuo de la superficie glaciar para cuantificar el volumen, tamaño y el cambio en su superficie, ya sea por acumulación de detritos u otro. Los cambios antrópicos asociados a un aumento sostenido de la temperatura, principalmente en alta montaña, pueden aumentar el riesgo hídrico de la cuenca debido a que estas constituyen la única reserva hídrica estival de la cuenca.

Finalmente, el seguimiento continuo de los glaciares de la comuna de Lo Barnechea es de vital para definir con precisión los límites actuales y para evaluar la tasa anual de cambio anual, generando una capa de información actualizada y consistente. Este monitoreo, junto con el análisis de la cobertura nival, es esencial para la preservación de los glaciares cuantificando además las variabilidad climáticas

directamente relacionadas con el monto de precipitación sólida que ocurren sobre y alrededor de los glaciares. Además, el estudio de la calidad de la nieve, su variabilidad, composición y grado de contaminación es imprescindible para entender la dinámica glacial. Cualquier disminución en la nieve o en la precipitación sólida podría predecir una futura reducción en la extensión de los glaciares.

6. Bibliografía

- Aranda, F., Medina, D., Castro, L., Ossandón, Á., Ovalle, R., Flores, R. P., & Bolaño-Ortiz, T. R. (2023). Snow persistence and snow line elevation trends in a snowmelt-driven basin in the central Andes and their correlations with hydroclimatic variables. *Remote Sensing*, 15(23), 5556.
- Brenning, A. (2008). The impact of mining on rock glaciers and glaciers. *Darkening peaks: glacier retreat, science, and society*, 196.
- Brenning, A., & Azócar, G. F. (2010). Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. *Revista de Geografía Norte Grande*, (47), 143-158.
- Burns, P., and A. Nolin. 2014. Using Atmospherically-Corrected Landsat Imagery to Measure Glacier Area Change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment* 140:165–178. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.026>.
- Durán-Alarcón, C. Gevaert, C.M. Mattar, C. Jiménez-Muñoz, J.C. Pasapera-Gonzales, J.J. Sobrino, J.A. Silvia-Vidal, Y. Fashé-Raymundo, O. Chavez-Espiritu, T.W. Santillan-Portilla, N. 2015. Recent trends on glacier area retreat over the group of Nevados Caullaraju-Pastoruri (Cordillera Blanca, Peru) using Landsat imagery. *Journal of South American Earth Sciences*, 59, 19-26.
- Dussaillant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A; Pitte, P & L. Ruiz, L. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes, *Nat. Geosci.*, 12, 802–808.
- Florath, J.; Keller, S.; Abarca-del-Rio, R.; Hinz, S.; Staub, G.; Weinmann, M. (2022). Glacier Monitoring Based on Multi-Spectral and Multi-Temporal Satellite Data: A Case Study for Classification with Respect to Different Snow and Ice Types. *Remote Sens.* 2022, 14, 845. <https://doi.org/10.3390/rs14040845>
- Hall, D. K., Riggs, G. A., & Salomonson, V. V. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote sensing of Environment*, 54(2), 127-140.
- Hall, D., J. Foster, D. Verbyla, A. Klein, and C. Benson. 1998. Assessment of Snow-Cover Mapping Accuracy in a Variety of Vegetation-Cover Densities in Central Alaska. *Remote Sensing of Environment* 66 (2): 127–140. [https://doi.org/10.1016/S00344257\(98\)00051-0](https://doi.org/10.1016/S00344257(98)00051-0).
- Herrera-Ossandón, M., Easton, G., Antinao, J.L. and Forman, S.L. 2023. Late Quaternary glacier advances in the Andes of Santiago, central Chile, and paleoclimatic implications. *Front. Earth Sci.* 11:1192812. doi: 10.3389/feart.2023.1192812
- Keshri, A. K., Shukla, A., & Gupta, R. P. (2009). ASTER ratio indices for supraglacial terrain mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 30(2), 519–524. <https://doi.org/10.1080/01431160802385459>
- Mohammadi, B., Pilesjö, P., & Duan, Z. (2023). The superiority of the Adjusted Normalized Difference Snow Index (ANDSI) for mapping glaciers using Sentinel-2 multispectral satellite imagery. *GIScience & Remote Sensing*, 60(1). <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2257978>
- Paul, F.; Bolch, T.; Kääb, A.; Nagler, T.; Nuth, C.; Scharrer, K.; Shepherd, A.; Strozzi, T.; Ticconi, F.; Bhambri, R.; et al. The glaciers climate change initiative: Methods for creating glacier area, elevation change and velocity products. *Remote Sens. Environ.* 2015, 162, 408–426.
- Raup, B.; Kääb, A.; Kargel, J.S.; Bishop, M.P.; Hamilton, G.; Lee, E.; Paul, F.; Rau, F.; Soltesz, D.; Khalsa, S.J.; et al. Remote sensing and GIS technology in the Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) Project. *Comput. Geosci.* 2007, 33, 104–125.

Shen, Y., Chen, Y., Bi, Y., Lyu, D., Chen, H., & Duan, S. (2022). Snowfall Microphysics Characterized by PARSIVEL Disdrometer Observations in Beijing from 2020 to 2022. *Remote Sensing*, 14(23), 6025.

Valenzuela-Astudillo, H. C. (2020). Los glaciares rocosos del Santuario de la Naturaleza Yerba Loca, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana.

Young, S. S. (2023). Global and Regional Snow Cover Decline: 2000–2022. *Climate*, 11(8), 162.

Zhang J, Jia L, Menenti M, Zhou J, Ren S. 2021. Glacier Area and Snow Cover Changes in the Range System Surrounding Tarim from 2000 to 2020 Using Google Earth Engine. *Remote Sensing*. 13(24):5117. <https://doi.org/10.3390/rs13245117>

7. Apéndices

Apéndice 1. Acceso a repositorio de datos

A continuación se detalla cómo acceder al repositorio de las bases de datos para su descarga.

1. Acceder a [Google Cloud Storage](#)
2. Descargar en cualquiera de los dos botones señalados en la imagen siguiente

lobarnechea-glaciares







| Location | Storage class | Public access | Protection |
|--------------------|---------------|---------------|------------|
| us-central1 (Iowa) | Archive | Not public | None |

OBJECTS CONFIGURATION PERMISSION PROTECTION LIFECYCLE OBSERVABILITY INVENTORY REPORTS OPERATIONS

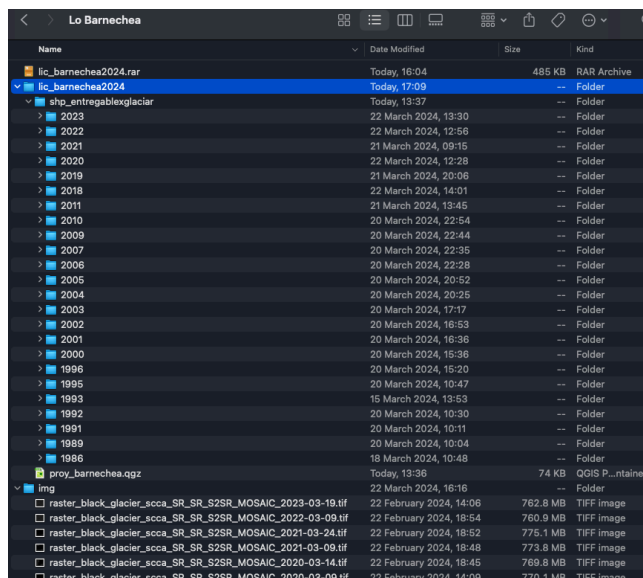
Buckets > lobarnechea-glaciares

UPLOAD FILES UPLOAD FOLDER CREATE FOLDER TRANSFER DATA MANAGE HOLDS EDIT RETENTION **DOWNLOAD** DELETE

Filter by name prefix only Filter Filter objects and folders Show Live objects only

| <input checked="" type="checkbox"/> | Name | Size | Type | Created | Storage class | Last modified | Public |
|-------------------------------------|---|----------|--------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> |  img.rar | 7.4 GB | application/octet-stream | 25 Mar 2024, 16:09:49 | Archive | 25 Mar 2024, 16:09:49 | Not p   |
| <input checked="" type="checkbox"/> |  lic_barnechea2024.rar | 473.7 KB | application/octet-stream | 25 Mar 2024, 15:51:10 | Archive | 25 Mar 2024, 15:51:10 | Not p   |

3. Descomprimir las carpetas
 - a. Shapes: Se encontrará una carpeta por año para las cartografías
 - b. Rasters: Se encontrará una imagen según la siguiente nomenclatura:
raster_black_glacier_scca_SR_SR_S2SR_MOSAIC_2023-03-19
 - i. nombre_proyecto_indice_tipo_tipo_sensor_telas_fecha



Apéndice 2. Tabla de atributos de shapefiles entregados.

Los shapefile con la delimitación de glaciares descubiertos se entregan con una tabla de atributos con cuatro columnas:

- **ID:** número de ID asignado (Ver Tabla 1 y 2).
- **Glaciar:** Nombre de glaciar.
- **Código:** Código asignado por la DGA en el IPG 2022.
- **AreaDesc:** Área superficie de glaciar descubierta en hectáreas [ha].

Los shapefile con la delimitación de glaciares rocosos y cubiertos se entregan con la tabla de atributos con cinco columnas:

- **ID:** número de ID asignado.
- **Nombre:** Nombre de glaciar.
- **COD_GLA:** Código asignado por la DGA en IPG 2022
- **COD_SSCUEN:** Código asignado a sub subcuena por la DGA.
- **Area_ha:** Área superficie de glaciar rocoso en hectáreas [ha].

Apéndice 3. Disponibilidad de imágenes en base de datos desarrollada.

Revisión de imágenes disponibles en base de datos generada para el proyecto, según nomenclatura de colores de rojo: no clasifica; verde: clasifica; gris: no hay información.

| Año | L5 | L7 | L8 | S2 | Observaciones |
|------|----|----|----|----|--|
| 1986 | | | | | |
| 1987 | | | | | Imagen no cubre área de estudio |
| 1988 | | | | | Imagen disponible, pero faltan muchos pixeles en área de glaciares |
| 1989 | | | | | Faltan algunos pixeles en área glaciar pero aún es posible |

| | | | | | |
|------|--|--|--|--|---|
| | | | | | realizar una delimitación |
| 1990 | | | | | Img no cubre área de estudio |
| 1991 | | | | | Faltan algunos pixeles en área de glaciares |
| 1992 | | | | | Imagen solo entrega información de los glaciares de Yerba Loca |
| 1993 | | | | | |
| 1994 | | | | | Img no cubre área de estudio |
| 1995 | | | | | Faltan pixeles en Área Glaciar |
| 1996 | | | | | Faltan pixeles en Área Glaciar |
| 1997 | | | | | No hay img para feb/mar |
| 1998 | | | | | Imagen disponible, pero faltan muchos pixeles en área de glaciares |
| 1999 | | | | | Imagen no cubre área de estudio |
| 2000 | | | | | Faltan algunos pixeles en área de glaciares pero es posible realizar una delimitación |
| 2001 | | | | | Faltan pixeles en área de glaciares, pero se complementa con L7 |
| 2002 | | | | | Faltan pixeles en área de glaciares, pero se complementa con L7 |
| 2003 | | | | | Faltan pixeles en área de glaciares, pero se complementa con L7 |
| 2004 | | | | | |
| 2005 | | | | | |
| 2006 | | | | | Faltan algunos pixeles en el área de glaciares pero es posible realizar una delimitación. |
| 2007 | | | | | |
| 2008 | | | | | Imagen no cubre área de estudio |
| 2009 | | | | | Imagen disponible, pero faltan muchos pixeles en área de glaciares |
| 2010 | | | | | |
| 2011 | | | | | Faltan algunos pixeles en área de glaciares pero es posible realizar una delimitación |
| 2012 | | | | | No hay imágenes |
| 2013 | | | | | Sólo una imagen de abril y no cubre área de estudio |
| 2014 | | | | | No cubre área |
| 2015 | | | | | No cubre área |
| 2016 | | | | | No cubre área |

| | | | | | |
|------|--|--|--|--|---|
| 2017 | | | | | Imagen disponible, pero faltan píxeles clave en área de glaciares |
| 2018 | | | | | |
| 2019 | | | | | |
| 2020 | | | | | |
| 2021 | | | | | Imagen disponible pero se descartó delimitación |
| 2022 | | | | | |
| 2023 | | | | | |

Apéndice 4. Superficie de glaciares por año de estudio. Tabla 5. Superficie de glaciar descubierta localizada en la comuna de Lo Barnechea entre 1986-2023.

| Glaciar | Paloma Oeste | Paloma Este | Del Rincón | Cerro el Plomo | S/N | Glaciarete S/N | TOTAL |
|---------|--------------|-------------|------------|----------------|--------|----------------|---------|
| 1986 | 149.69 | 71.75 | 69.92 | 195.13 | 40.07 | 15.88 | 542.44 |
| 1989 | 139.26 | 67.78 | 52.02 | 165.105 | 34.984 | 12.695 | 471.844 |
| 1993 | 143.65 | 64.19 | 59.28 | 173.86 | 35.83 | 13.88 | 490.69 |
| 1995 | 143.65 | 64.19 | 56.14 | 173.47 | 35.48 | 13.88 | 486.81 |
| 1996 | 141.52 | 61.78 | 52.18 | 167.91 | 34.08 | 14.25 | 471.72 |
| 2000 | 138.05 | 59.22 | 52.232 | 165.172 | 34.56 | 12.392 | 461.626 |
| 2001 | 136.19 | 57.64 | 54.049 | 149.74 | 33.9 | 12.15 | 443.669 |
| 2002 | 134.635 | 57.527 | 53.074 | 148.45 | 33.51 | 11.846 | 439.042 |
| 2003 | 133.861 | 57.327 | 53.44 | 146.68 | 32.92 | 11.43 | 435.658 |
| 2004 | 133.861 | 57.327 | 53.44 | 141.19 | 32.92 | 11.43 | 430.168 |
| 2005 | 132.9 | 55.96 | 52.04 | 138.72 | 32.59 | 11.23 | 423.44 |
| 2006 | 132.9 | 54.78 | 54.6 | 147.29 | 32.59 | 11.23 | 433.39 |
| 2007 | 132.9 | 54.78 | 57.05 | 146.24 | 32.59 | 11.23 | 434.79 |
| 2010 | 132.49 | 51.53 | 52.41 | 141.74 | 33.61 | 12.03 | 423.81 |
| 2011 | 129.79 | 47.7 | 42.54 | 137.87 | 33.32 | 12.03 | 403.25 |
| 2018 | 112.589 | 43.96 | 17.47 | 101.59 | 29.26 | 10.45 | 213.729 |
| 2019 | 97.94 | 28.13 | 16.1 | 86.68 | 26.877 | 5.37 | 261.097 |
| 2020 | 80.12 | 17.3 | 14.64 | 71.6 | 21.63 | 5.48 | 210.77 |

| | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|--------|
| 2022 | 72.64 | 13.23 | 12.71 | 64.83 | 19.86 | 5.36 | 188.63 |
| 2023 | 68.57 | 12.41 | 12.71 | 63.06 | 19.86 | 5.36 | 181.97 |