

## **RETROCESO DE GLACIARES CON IMÁGENES ÓPTICAS Y RADÁRICAS: GLACIAR OLIVARES Y JUNCAL SUR.**

### **GLACIER RETREAT WITH OPTICAL AND RADAR IMAGES: OLIVARES GLACIER AND JUNCAL SUR.**

Sra. Claudia Ibáñez Grass<sup>1</sup>; Sra. Joselyn Robledo Ceballos<sup>2</sup>

#### **RESUMEN**

La mayoría de los glaciares en Chile han experimentado fuertes retrocesos y reducciones de superficie desde tiempos históricos hasta la actualidad en respuesta a cambios climáticos globales (1). El cambio climático no es el único factor, dado que tanto la intervención antrópica y/o factores naturales pueden contribuir a acelerar la disminución glacial. Estudios y mediciones realizadas por investigadores, han revelado que los glaciares andinos de la zona central están cada vez más vulnerables a procesos de pérdida de masa y fragmentación producto del oscurecimiento del hielo y su efecto en la absorción de radiación solar, fenómeno conocido como efecto de albedo. No sólo están perdiendo superficie, sino que también se están adelgazando, ya que gran parte de los glaciares de la zona central, y en particular de la Región Metropolitana, no tienen más de algunas decenas de metros de altura. Tener conocimiento de la variación del área glacial es fundamental para el proceso de toma de decisiones en el manejo y conservación de las reservas de agua en estado sólido y de esta manera enfrentar las potenciales crisis hídricas en la región a lo largo del tiempo. A través de técnicas de teledetección y el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se busca determinar la variación en área y volumen que han experimentado los glaciares Olivares Alfa, Beta, Gamma y Juncal Sur y a la vez calcular la velocidad actual de desplazamiento del glaciar Juncal Sur.

Palabras claves: glaciar. albedo. velocidad de desplazamiento del glaciar. retroceso glaciar.

#### **ABSTRACT**

Most of the glaciers in Chile have experienced strong retreats and surface reductions from historical times to the present in response to global climate changes (1). Climate change is not the only factor, since both human intervention and/or natural factors can contribute to accelerating glacial decline. Studies and measurements carried out by researchers have revealed that the Andean glaciers of the central area are increasingly vulnerable to processes of mass loss and fragmentation as a result of the darkening of the ice and its effect on the absorption of solar radiation, a phenomenon known as the albedo effect. Not only are they losing surface, but they are also getting thinner, since a large part of the glaciers in the central zone, and in particular in the Metropolitan Region, are no more than a few tens of meters high. Having knowledge of the variation of the glacial area is essential for the decision-making process in the management and conservation of solid water reserves and thus face potential water crises in the region over time. Through remote sensing techniques and the use of Geographic Information Systems (GIS), the aim is to determine the variation in area and volume experienced by the Olivares Alfa, Beta, Gamma and Juncal Sur glaciers and at the same time calculate the current speed of movement Juncal Sur Glacier.

Keywords: glacier. albedo. glacier displacement speed. glacial retreat.

---

<sup>1</sup> Cartógrafa, especialista sección IDE Servicio Aerofotogramétrico de la Fuerza Área de Chile (SAF)

<sup>2</sup> Ingeniera en Ejecución en Geomensura, Experta Universitaria en Calidad Cartográfica, sección IDE SAF.

Fecha de recepción: 26 de Julio de 2022.

Fecha de aprobación: 10 de Octubre de 2022

## INTRODUCCIÓN

El sistema glacial Olivares corresponde a la mayor concentración de glaciares en la Región Metropolitana y el más grande fuera del sur de Chile. Emplazado en la zona noreste de Santiago, tiene una superficie de 25 mil km<sup>2</sup> destacando aquellos que descienden hacia el sur del Nevado Juncal, en especial el Olivares Alfa, Beta, Gamma y Juncal Sur (Figura 1), que en la pequeña Edad del Hielo hace aproximadamente 150 años Antes del Presente (3) estaban unidos formando una sola masa de hielo de cerca de 110 km<sup>2</sup> de superficie. En la actualidad estos glaciares tienen un área de solo 54 km<sup>2</sup> debido a que han experimentado un fuerte retroceso y adelgazamiento debido principalmente al aumento de las temperaturas atmosféricas en altura. Estos glaciares corresponden a la principal fuente de agua de la ciudad de Santiago, por lo que juegan un papel importante dentro del sistema hidrológico de la región.

El ventisquero Olivares ha experimentado entre 1935 y 1956 una fragmentación en al menos 4 glaciares, conformando desde 1943 el Alfa y el Beta y en 1951 el Beta y el Gamma, evidenciando una importante reducción en área la cual continúa hasta el presente, con cada vez mayores retrocesos, adelgazamientos y fragmentaciones.

El glaciar Juncal Sur ha perdido 25% de su superficie desde 1955. Su retroceso medido desde la posición frontal entre 1950 y el 2018 es de aproximadamente 5 km lineales. El glaciar Olivares Beta, pasó de tener un área de 12,8 km<sup>2</sup> en 1955 a 8,4 km<sup>2</sup> en el 2018 distribuida en 8 fragmentos, lo que representa una pérdida de un 34%. En el caso del Olivares Alfa, el retroceso y pérdida de superficie es aún mayor, puesto que el área de 1955 era de 17,5 km<sup>2</sup> mientras que en el 2018 se ha fragmentado en 9 partes, que totalizan 5,9 km<sup>2</sup>, lo que representa una pérdida del 66% de su superficie (2)

## MATERIALES Y MÉTODO

Para este estudio se ha empleado una compilación de fotografías aéreas históricas del Servicio Aerofotogramétrico (SAF) de los proyectos Chile 60 (1976-1988) y Fondef 30 (1992-1994) las cuales han sido georreferenciadas para realizar la delimitación y mapeo de la superficie glaciar. También se han empleado imágenes satelitales Landsat 8 OLI y Sentinel 2, de los años 1986, 2000

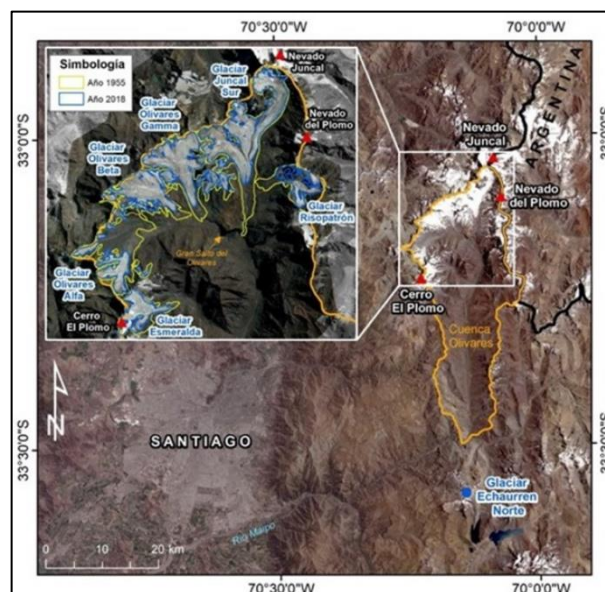


Figura 1: Mapa de ubicación general. Fuente: Cartas Aeronáuticas 1:250.000 Santiago y San José de Maipo. Autorizada su circulación por Resolución N°49 del 10 mayo 2019 de DIFROL.

y 2010 (períodos comprendidos entre el 01 de enero y el 31 de diciembre), las que fueron analizadas con composiciones (RGB 5/4/3) con el objetivo de estimar el frente del glaciar. Mediante el uso de un SIG se calcularon los Índices Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) y Diferencial Normalizado de Glaciar (NDGI). Se delimitaron los glaciares, utilizando bandas del espectro visible rojo y verde, del infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR). Posteriormente se reclasifican los valores de los índices (4), estableciendo como superficie de hielo o nieve aquel pixel con valor superior a 0,4.

Las imágenes de radar han permitido realizar observaciones interferométricas y de correlación de fase, logrando generar modelos digitales de terreno con topografía superficial, determinaciones precisas de variaciones frontales del hielo y estimación de velocidades superficiales del hielo. Para esto es necesario comparar dos imágenes de satélite de radar tomadas con escasa separación de tiempo, desde una misma línea base (5)

Las imágenes de radar utilizadas para generar Modelos Digitales de Elevación (DEM) interferométricos corresponden al sensor Sentinel-1, de tipo Simple Look Complex (SLC), modo IW, de enero del año 2015 y 2020. Para los cálculos de

desplazamiento del glaciar, se utilizaron imágenes del mismo sensor, pero del tipo GRDH (Detected High-Res Dual-Pol), para interferometría de radar (InSAR), modo IW, del año 2020 de 2 temporalidades diferentes del mes de enero.

Otra fuente de información ha sido la histórica, dado la gran cantidad de descripciones que existen en crónicas o exploraciones que han sido mapeadas.

## RESUMEN METODOLÓGICO

### IMÁGENES ÓPTICAS.

El análisis de los cuatro glaciares en estudio, se realizó utilizando imágenes del archivo histórico del SAF e imágenes satelitales multiespectrales de fuentes abiertas, con las cuales se generaron los índices anuales NDSI y NDGI para los años 1986, 2000 y 2020, lo que permitió evidenciar variaciones significativas en la superficie de los glaciares. La secuencia metodológica es la que se describe a continuación:

- Georreferenciación de imágenes históricas del SAF.
- Cálculo de índices espectrales NDSI y NDGI.
- Delimitación de glaciares.
- Cuantificación de área perdida en glaciares.

### IMÁGENES RADÁRICAS

El estudio radárico se dividió en 2 fases:

- Generación DEM interferométrico de los años 2015 y 2020.
- Generación mapa de velocidades de desplazamiento del glaciar Juncal Sur, año 2020, periodo enero.

## RESULTADOS

### IMÁGENES ÓPTICAS.

Los resultados de los análisis por glaciar contemplan el índice NDGI para los años 1986, 2000 y 2020, según se observa en las Figuras 2 y 3 respectivamente.

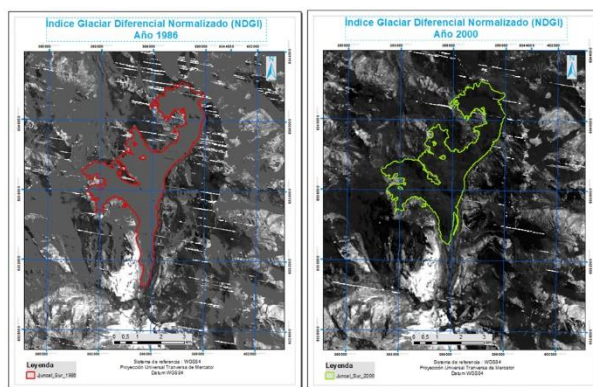


Figura 2: NDGI aplicado en el sector glaciar Juncal Sur para los años 1986 (A) y 2000 (B). Fuente: Elaboración propia

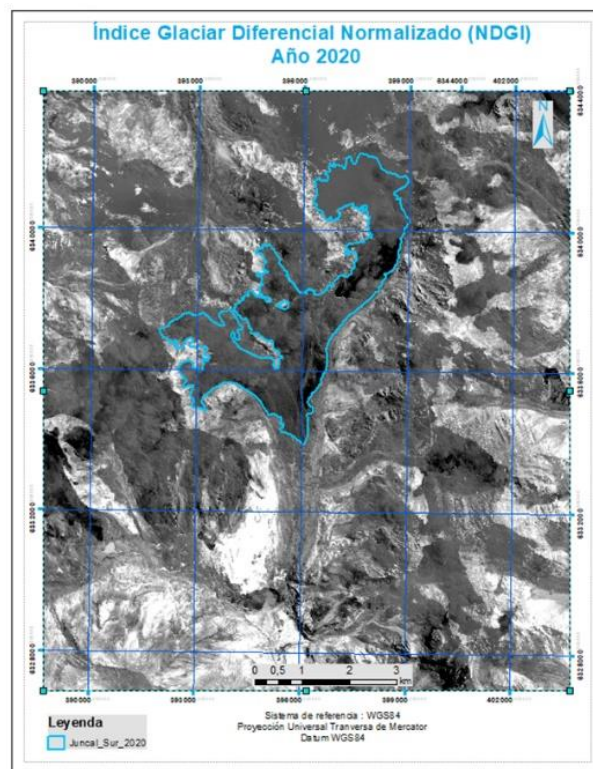


Figura 3: NDGI aplicado en el sector glaciar Juncal Sur para el año 2020. Fuente: Elaboración propia.

La misma metodología fue utilizada para los glaciares Olivares Alfa, Beta y Gamma, obteniendo los siguientes resultados:

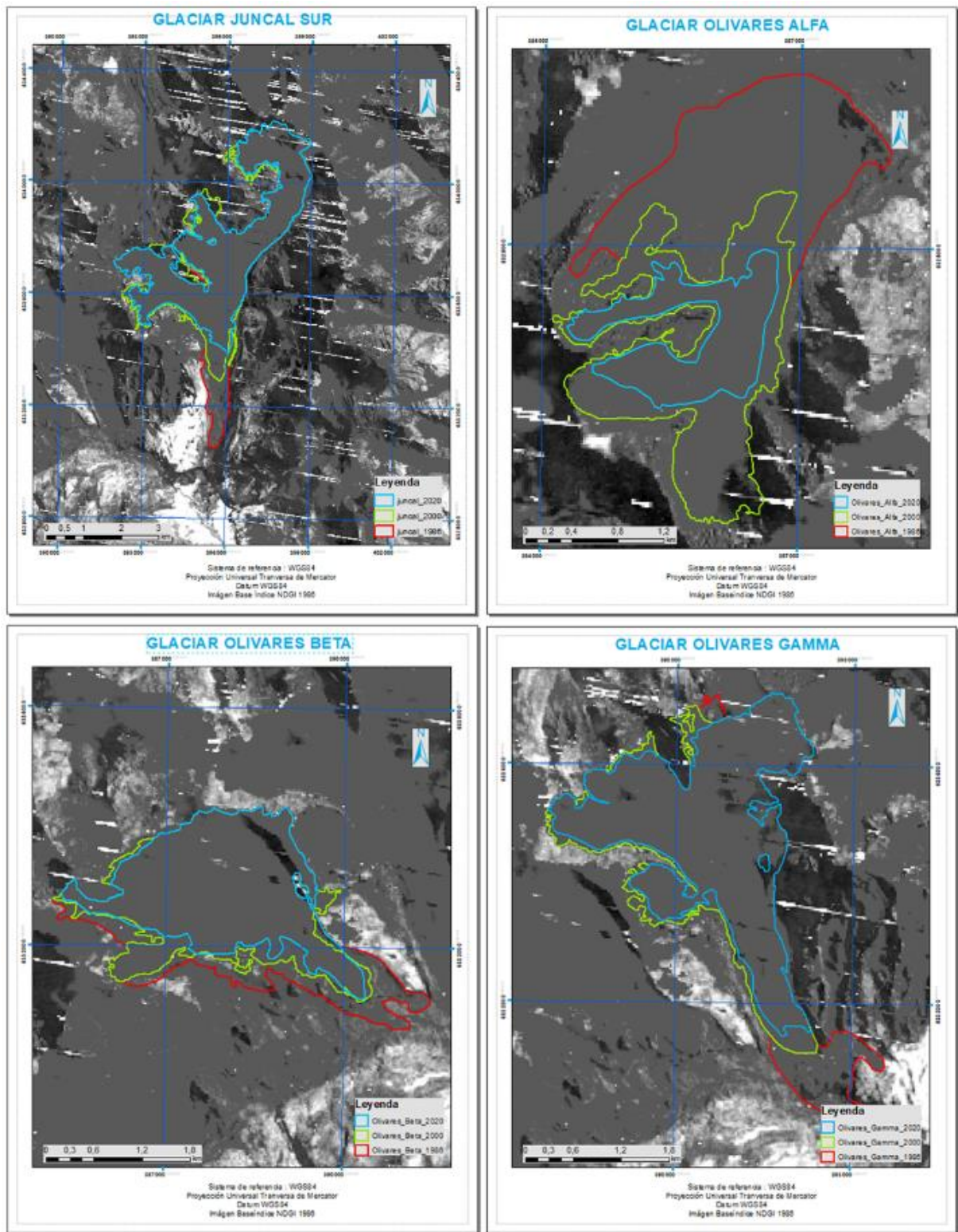


Figura 4: Retroceso temporal de los glaciares Juncal Sur (A), Olivares Alfa (B), Beta (C) y Gamma (D) durante los años 1986 (rojo), 2000 (verde) y 2020 (azul). Fuente: elaboración propia.

Al observar las imágenes anteriores se evidencia una tendencia a la reducción de área entre 1955 y 2020 (véase tabla 1). La máxima reducción ocurre entre 1955 y 1986, afectando a los glaciares

Olivares Alfa y Juncal Sur. La siguiente tabla y su respectivo gráfico muestran la variación en superficie de cada glaciar:

Glaciar	Superficie por año (km <sup>2</sup> )						Variación Área
	1955	1986	2000	2011	2018	2020	
Juncal Sur	33.5	22.811	21.439	21.098	20.63	18.529	14.971
Olivares Alfa	17.5	9.446	6.47	6.1	5.9	2.04	15.46
Olivares Beta	13.69	10.636	9.331	8.56	7.4	7.064	6.626
Olivares Gamma	15.76	14.097	13.231	12.52	11.6	9.937	5.823

Tabla 1: Variación superficie de glaciares expresada en km<sup>2</sup>. Fuente: Elaboración propia. Datos 1955/2011/2018 SINIA - Datos 1986/2000/2020 cálculos SAF

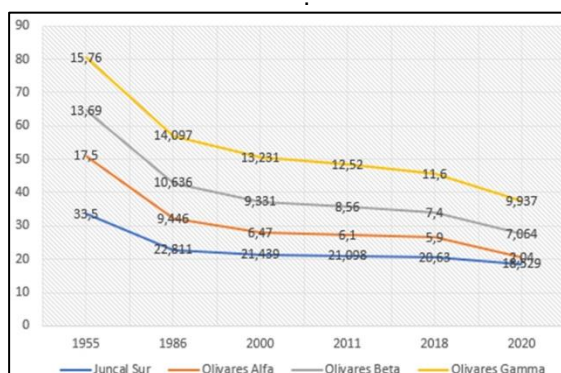


Gráfico 1: Retroceso histórico de glaciares en la Región Metropolitana. Fuente: Elaboración propia.

### IMÁGENES RADÁRICAS.

A continuación, se entregan los resultados del análisis realizado con imágenes radáricas tanto para la generación de los DEM como para el cálculo de velocidades de la zona glaciar.

#### i. Diferencia de volumen entre DEM 2015 y 2020

Para delimitar la zona de interés se utilizaron los polígonos generados con el análisis de las imágenes ópticas. Estos corresponden al área del glaciar del año 1986. Luego del procesamiento mediante interferometría, se obtuvieron como resultado dos DEM, uno para el año 2015 y otro para el año 2020 (Figura 5):

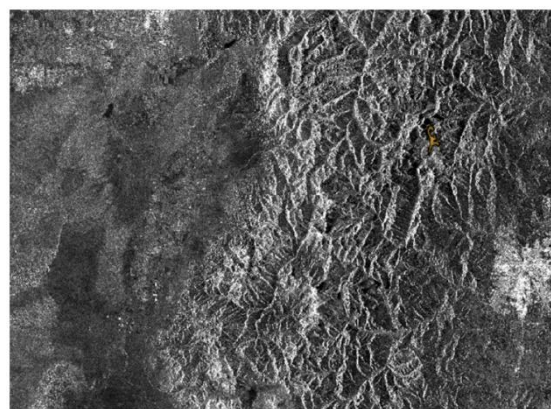


Figura 5: DEM Imágenes radáricas Sentinel-1 2015 y 2020. Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos los DEM, se procede a generar el mapa de diferencias de altura, lo que permite en una primera aproximación determinar los deltas existentes entre estos dos periodos. En la Figura 6, se puede apreciar en color anaranjado y amarillo las zonas de los glaciares que presentan mayor variación de volumen.

Con respecto al mapa de diferencias, si bien se pueden obtener los deltas, se observa que son correspondientes a un promedio con respecto al área total de los glaciares y sus cercanías. Para efectuar el análisis específico, se requiere contar con el área de interés. Por lo anterior, se determina nuevamente esta diferencia acotando el cálculo

solo a la superficie glaciar como se muestra en la figura 7.

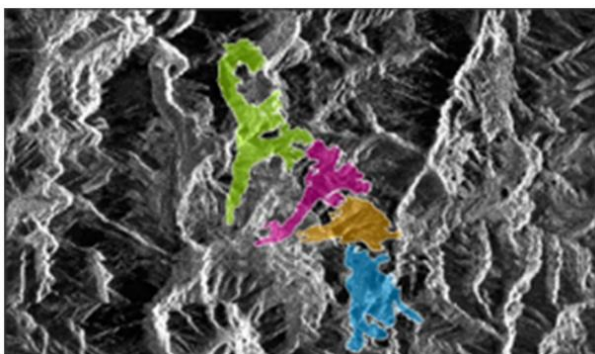


Figura 6: Mapa cualitativo de diferencias de altura de los DEM 2015 y 2020. Fuente: Elaboración propia.

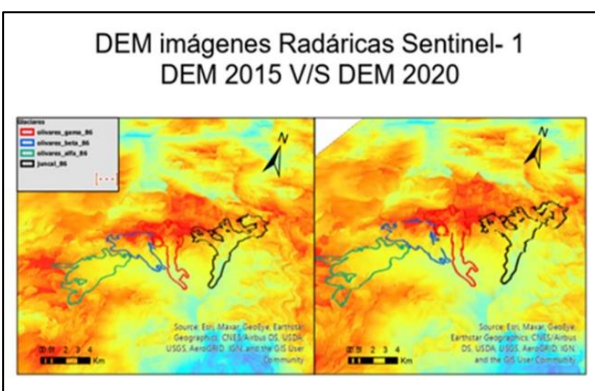


Figura 7 Mapa cualitativo de diferencias de volumen en cada uno de los glaciares entre los DEM 2015 y 2020. Fuente: Elaboración propia.

En el mapa anterior se observan las diferencias en volumen las cuales se corresponden exactamente con las zonas de mayor retroceso del glaciar en los últimos años. La evaluación cuantitativa requiere de imágenes radáricas de mayor precisión, pues se debe considerar que las utilizadas tienen precisiones de 5 m y los DEM se degradan a precisiones entre 15 y 20 m, lo que no permite de manera exacta determinar los deltas reales para dicho período.

ii. Velocidad de desplazamiento.

Estos mapas se realizan con dos imágenes del año 2020 (07 y 31 de enero) y a través de la diferencia de fases se calculan las velocidades de desplazamiento del glaciar. En primera instancia se calculó para la zona con los cuatro glaciares, pero al ser valores muy generales se decide

efectuar el cálculo de manera más específica en el glaciar Juncal Sur (Figura 8).

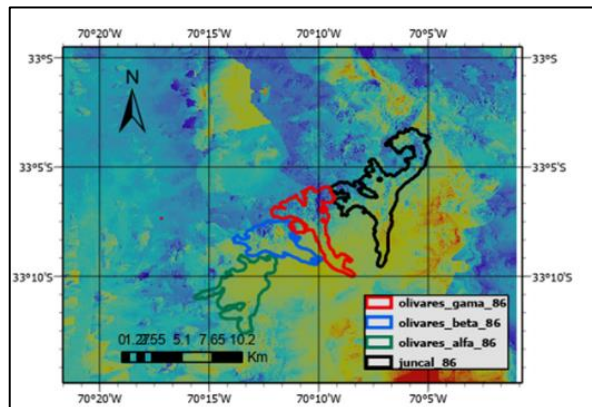


Figura 8: Resultado velocidades de desplazamiento promedio (cm) en los 4 glaciares. Fuente: Elaboración propia.

De la imagen anterior, se deduce que las velocidades promedio de desplazamiento en el sector para el período comprendido entre el 07 y 31 de enero del 2020 es de 8,5 cm, lo que es coherente con desplazamientos para meses de deshielo.

Con respecto al glaciar Juncal Sur, se puede indicar que el desplazamiento estuvo en torno a los 4,6 cm en este mismo período. Esto indica un masivo dinamismo reflejando un deshielo generalizado en el área, coherente con la época de deshielo (período estival). Esto en conjunto con la pérdida de área y volumen evidencian el proceso acelerado de retroceso del glaciar (Figura 9).

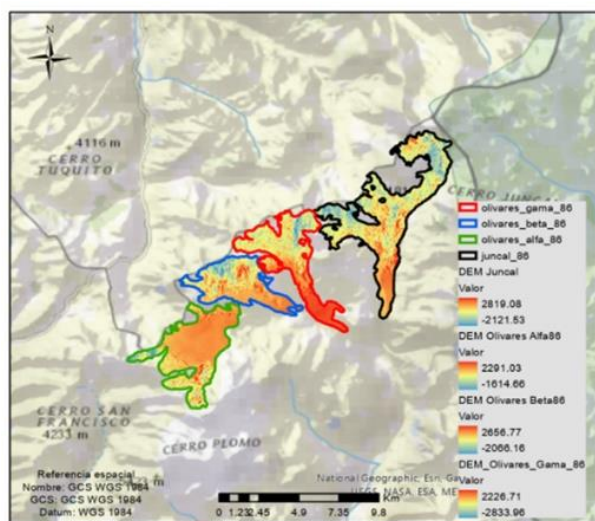


Figura 9: Mapa cualitativo velocidades de desplazamiento promedio (cm) en glaciar Juncal Sur.  
Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Las imágenes ópticas y los índices medio ambientales (NDSI y NDGI) calculados, evidencian una disminución en superficie, desde el año 1986 hasta el 2020. La generación del DEM permitió determinar de manera cualitativa la disminución en volumen de los glaciares entre los años 2015 y 2020. Además, con el mapa de velocidades se visualizan movimientos de hasta 8,5 cm en la zona del complejo Olivares y de 4,6 cm para el glaciar Juncal Sur para el periodo comprendido entre el 07 y 31 de enero del 2020.

El complementar técnicas de imágenes ópticas y radáricas, constituye una herramienta eficiente para el monitoreo constante de los glaciares, debido a la disponibilidad histórica y periódica de las imágenes.

El análisis de la variación de área glaciar para un período de 55 años permite evidenciar una reducción progresiva en área y volumen de todos los glaciares estudiados.

La tendencia a la disminución de área de glaciar puede ser atribuida a los cambios climáticos globales (6) y a la declinación de las precipitaciones registradas en los últimos años.

Finalmente señalar que, si se desea contar con datos de mayor calidad, este estudio debe ser apoyado por trabajo de terreno, sondaje y

complementado con imágenes de mayor resolución.

## REFERENCIAS

RIVERA, A., CID, G., PELTIER, C. y KAPLAN, M. *Variaciones glaciares desde la Pequeña Edad del Hielo en la cuenca alta del río Olivares, Chile central*. Santiago : s.n., 2019.

MASIOKAS, M., RIVERA, A., ESPIZÚA, L., VILLALBA, R., DELGADO, S., and ARAVENA, J.C. *Fluctuaciones de glaciares en Sudamérica extratropical durante los últimos 100 años*. 2009.

DOZIER, J. *Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper*. 1989.

PATERSON, W. *The Physics of Glaciers*. 1994.

GRUPO INTEGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO, IPCC. *Resumen técnico Cambio Climático*. 2013.

BARCAZA, G., NUSSBAUMER, S., TAPIA, G., VALDÉS, J., GARCÍA, J.L., VIDELA, Y., ALBORNOZ, A., ARIAS, V. *Inventario de glaciares y variaciones glaciares recientes en los Andes de Chile, América del Sur*. Santiago : s.n., 2017.

LLIBOUTRY, L. *Nieves y Glaciares de Chile. Fundamentos de Glaciología*. Santiago : Ediciones Universidad de Chile.