

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS GLACIARES DEL COMPLEJO VOLCÁNICO NEVADOS DE CHILLÁN

CLIMATE CHANGE EFFECTS ON THE GLACIAR COVER OF NEVADOS DE CHILLAN VOLCANIC COMPLEX

Sr. Muller De Moraes Balboa¹, Sr. Carlos Lara², Sr. Álvaro Paredes³, Sr. Bernardo Broitman⁴

RESUMEN

Las variaciones climáticas a escala global están afectando a los diferentes ecosistemas, entre ellos los glaciares, principales reservas de agua dulce del planeta. El objetivo de este trabajo fue determinar los cambios superficiales en las coberturas glaciares del Complejo Volcánico Nevados de Chillán y relacionarlos con las variaciones meteorológicas para entender el efecto del cambio climático sobre este tipo de ecosistemas, a través de un estudio multitemporal de imágenes LANDSAT TM y OLI de 3 épocas distintas (1999, 2009 y 2019). Se realizó un análisis espectral basado en dos índices: 1) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y 2) Índice de Nieve de Diferencia Normalizada (NDSI). Dos variables meteorológicas fueron analizadas: precipitación y temperatura ambiental, considerando los promedios mensuales durante las mismas fechas en las que se obtuvieron las imágenes satelitales. Los resultados obtenidos al analizar los índices espectrales, indican una disminución superficial en la evolución temporal de los glaciares. En las dos variables meteorológicas analizadas se observaron variaciones que respaldan la hipótesis de como el cambio climático está contribuyendo en el derretimiento de los glaciares en el área de estudio. El trabajo realizado deja en evidencia la notoria disminución de las superficies glaciares y su posible relación con el cambio climático.

Palabras claves: cambio climático, glaciares, LANDSAT, índices ambientales

ABSTRACT

The climatic variations/climatic change are/is affecting the different ecosystems, such glaciers, which are the largest reservoirs of water on the planet. The goal of this study was to determine the superficial changes of glacier cover in "Nevados de Chillán" Volcanic Complex and to relate their changes to meteorological variations. In order to understand the effect of climate change on this ecosystem, a multi-temporal study of LANDSAT TM and OLI images from 3 different periods (1999, 2009 and 2019) was carried out. We performed a spectral analysis based on two indices: 1) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and 2) Normalized Difference Snow Index (NDSI). Two meteorological variables were analyzed: precipitation and environmental temperature, using the monthly averages during the same dates in which the satellite images were obtained. Our results indicate a superficial decrease in the temporal evolution of glaciers. In the two meteorological variables, the observed variations support our hypothesis that climatic change is contributing to the melting of glaciers in the study area. This study evidences the significant decrease of glacier surfaces and its possible relationship with the rapid climatic change.

Keywords: climate change, glaciers, LANDSAT, environmental indices.

¹ Escuela Ciencias de la Tierra, Observatorio en Gestión de Riesgo de Desastres, Universidad Bernardo O'Higgins, bruno.demoraes50@gmail.com

² Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad Católica de la Santísima Concepción, carlos.lara@ucsc.cl

³ Consultora Ambiental TECPAR, aaparede@uc.cl

⁴ Departamento de Ciencias, Facultad de Artes Liberales & Bioengineering Innovation Center, Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibáñez, bernardo.broitman@uai.cl

Fecha de recepción: 08 de julio de 2020

Fecha de aprobación: 12 de noviembre de 2020

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la evidencia científica ha demostrado un aceleramiento en la tasa de pérdida de cobertura glaciar en varias regiones montañosas debido principalmente a variaciones en temperatura, cambios en régimen de precipitaciones y radiación, debido a los efectos del cambio climático (Khoromova et al., 2006; Reinthaler et al., 2019). Una de las regiones más afectadas por el cambio climático es el Ártico, donde la extensión del hielo marino ha disminuido ~ 12% durante el periodo 1970-2012 (Stroeve et al., 2012; Jakobsson et al., 2014), mientras en algunas secciones de la Antártica (e.g. Mar de Bellingshausen), el 90% de los glaciares ha retrocedido por efecto del incremento del contenido de calor en la capa superficial del océano austral (Cook et al., 2016).

En la región cordillerana de Latinoamérica, el proceso de glaciación ha generado una pérdida de 27.4% de la cobertura de hielo asociado a volcanes activos, en donde después de México, la región de Chile central (35°-38°S) presenta valores de pérdida de hielo glaciar de un 61.8% (Nicholson et al., 2009; Reinthaler et al., 2019). Estas masas de hielo continúan experimentando constantes cambios, siendo los principales responsables el aumento en la temperatura ambiental y la disminución en las precipitaciones (Falvey y Garreaud, 2009). Además de los efectos del cambio climático sobre el retroceso de coberturas glaciares, la actividad volcánica (calor interno, emanación de gases calientes, alteración hidrotermal) también contribuye a la desestabilización y destrucción de estos, con aproximadamente un 25% de pérdida de masa (Pulgarín et al., 2008; Rivera et al., 2012)

El complejo volcánico Nevados de Chillán, es considerado uno de los más peligrosos de los sistemas volcánicos activos en Chile, con cinco erupciones comprobadas en registros históricos y recientes (Naranjo et al., 2008), y debido además a su cercanía a poblados (Orozco et al., 2016). El año 2011 el Complejo Nevados de Chillán contaba con 25 glaciares distribuidos a lo largo del centro montañoso/glaciar (Naranjo et al., 2008), los que han mostrado una notoria disminución en su cobertura en las últimas décadas (83% en los últimos 36 años), siendo el centro glaciológico de la zona glaciológica “Sur A” con mayor tasa de retroglaciación de acuerdo a la Dirección General

de Aguas (DGA, 2011).

El estudio de cambio de cobertura glaciar, utilizando datos satelitales de media (e.g. LANDSAT Multispectral Scanner (MSS), LANDSAT Thematic Mapper (TM) and Enhanced Thematic Mapper (ETM+)) y alta resolución (e.g. ASTER) han jugado un importante rol en la determinación del inventario y monitoreo de glaciares a lo largo de la región Volcánica de Chile (Bown et al., 2008; Rivera & Bown, 2013; Caro, 2014; Malmros et al., 2018). El análisis multitemporal utilizando imágenes satelitales ha mostrado su eficacia evidenciando el comportamiento de diferentes fenómenos y procesos ambientales a través del tiempo (Cárcamo, 2015), tales como el aumento del nivel del mar, variaciones del estado fenológico de la vegetación (Lara et al., 2018) y aceleración de la pérdida de hielo en regiones costeras, entre otras (Kozhikkodan et al., 2016). El objetivo de esta investigación es determinar los cambios superficiales en las coberturas glaciares del Complejo Volcánico Nevados de Chillán utilizando imágenes satelitales LANDSAT durante 20 años y su posible relación con temperatura ambiental y precipitaciones como aproximaciones indirectas de los efectos del cambio climático.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El Complejo Volcánico Nevados de Chillán (36°52'S-71°22'O), ubicado en la zona cordillerana de la región de Nuble (Figura 1), es considerado dentro de la zona glaciológica “Sur A” del territorio nacional según el Informe Sobre Variaciones Recientes de Glaciares en Chile (DGA, 2011). Este complejo cuenta con 17 centros de emisión volcánica distribuidos en los sub-complejos “Las Termas” y “Cerro Blanco” alineados en una orientación Noroeste-Sudeste (Bustos, 2018).

Los principales afluentes que nacen desde la zona de estudio, por los cuales desaguan las masas de hielo del Complejo Volcánico son la quebrada Santa Gertrudis, la cual desagua hacia el norte del complejo volcánico, mientras que al este convergen el estero Cajón Nuevo y Río Gato. Hacia el oeste destacan las quebradas del Estero San José, del río Chillán y del Estero Renegado, al sur el río Diguillín (Naranjo et al., 2008). Las cuencas hidrográficas de la zona presentan un régimen

históricamente pluvio-nival, caracterizadas por grandes altos durante los meses de invierno (Gómez, 2015). Hasta el año 2011 existía una cantidad de 25 masas de hielo en el Complejo Volcánico Nevados de Chillán, entre ellos cinco glaciares de montaña y 20 glaciaretos, sumando un total de 2.73 km² de superficie según el Informe S.I.T. N° 261 "Variaciones Recientes de Glaciares de Chile, Según Principales Zonas Glaciológicas" (DGA, 2011).

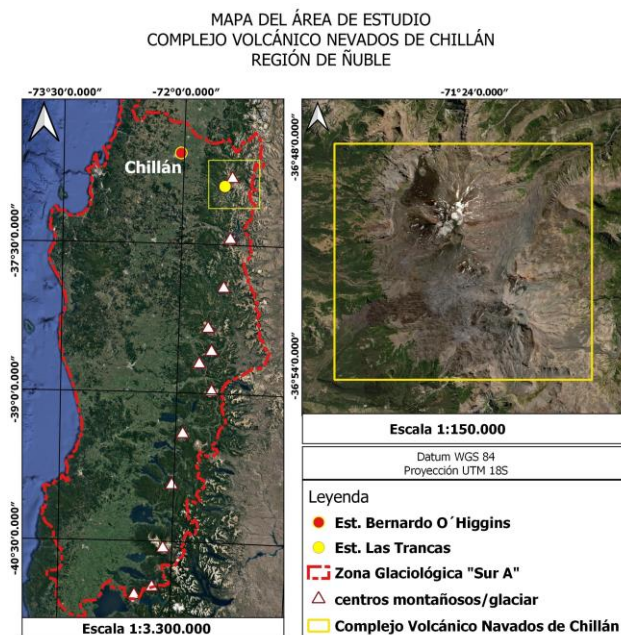


Figura 1: Ubicación espacial del Complejo Volcánico Nevados de Chillán. A la izquierda se muestra la Zona Glaciológica "Sur A" y todos los centros montañosos/glaciar que la componen. A la derecha se observa la ubicación geográfica del área de estudio. Información Cartográfica extraída desde el sitio web del Ministerio de Bienes Nacionales.

El área de estudio presenta un clima caracterizado por ser del tipo Mediterráneo-Cálido, con estaciones secas y lluviosas, de alrededor de ocho meses y cuatro meses cálidos-húmedos (Gómez, 2015), presentando precipitaciones medias anuales de 1058 mm y una temperatura media anual de 13,3°C según reportes meteorológicos de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC, 2019). La mayor cantidad de nieve caída en el área de estudio se produce entre los meses de agosto y septiembre, meses en los cuales el sub-complejo

"Termas" es mayoritariamente concurrido por el turismo debido a la ubicación del complejo turístico "Termas de Chillán".

IMÁGENES SATELITALES Y DATOS METEOROLÓGICOS

El análisis de imágenes satelitales es, debido a su alta resolución espacial y temporal, primordial para una comprensión mayor de los procesos que se desarrollan sobre la superficie terrestre y la evolución a la que están sometidos diversos ecosistemas naturales (Huayaney y Meléndez, 2009). Las imágenes satelitales adquiridas corresponden a las fechas 5 de marzo de 1999 y 1 de abril de 2009. Ambas imágenes fueron capturadas por el sensor TM a bordo del satélite LANDSAT-5, el cual cuenta con una resolución espectral que varía entre 0.45 y 2.35 um, y resolución espacial de 30 metros (Olave-Solar et al., 2008). Finalmente, la condición actual es obtenida con fecha 29 de abril de 2019, a partir del sensor OLI (Operational Land Imager) transportado por el satélite LANDSAT-8, caracterizado por una resolución espectral que varía entre los 0,43 y 1,38 um y una resolución espacial de 30 metros (Corrales, 2017). Los programas utilizados para el procesamiento de las imágenes y extracción de información satelital fueron ENVI (Environment for Visualizing Images) versión 4.6, desarrollado por Spectral Sciences Inc. (Kruse, 2004) y Quantum Gis versión 2.18, un Sistema de Información Geográfico (SIG) de código abierto.

Tabla 1: Ecuaciones para cada índice, respecto a cada sensor satelital.

Sensor	Índice	Ecuación
LANDSAT-5	NDVI	$(B4 - B3) / (B4 + B3)$
	NDSI	$(B2 - B5) / (B2 + B5)$
LANDSAT-8	NDVI	$(B5 - B4) / (B5 + B4)$
	NDSI	$(B3 - B6) / (B3 + B6)$

Todas las imágenes satelitales fueron obtenidas desde la plataforma USGS adquiridas a través de Earth Explorer del Servicio Geológico de Estados Unidos (United States Geological Survey USGS) (USGS, 2019). Las bandas utilizadas para la generación de los índices espectrales NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y NDSI

(Normalized Difference Snow Index) se muestran en la tabla 1. Finalmente, series mensuales de temperatura del aire (°C) y precipitaciones (mm) para los sitios de Las Trancas y Bernardo O'Higgins fueron extraídos desde la plataforma Center for Climate and Resilience Research (<http://explorador.cr2.cl/>) para el período 2009-2019 (Figura 1).

El cálculo de ambos índices, NDVI y NDSI respectivamente, fue realizado en ENVI, utilizando las ecuaciones de la tabla 1. Posteriormente, ambos productos fueron re-clasificados y fueron calculadas las superficies glaciares en base a polígonos vectoriales de cada índice. En este trabajo, se utilizó el NDSI debido a su potencial para discriminar entre nieve, suelo, rocas y cobertura de nubes, donde para imágenes LANDSAT, la cobertura glaciar se encuentran asociados a valores de NDSI entre 0.5 y 0.7 mientras que el NDVI permite mejorar la discriminación de cuerpos de agua, vegetación entre otros usos (Bajracharya et al., 2014).

RESULTADOS

Una disminución en las superficies glaciares fue observada en el año 2019 respecto a la imagen del año 1999. Una vez obtenidos los valores de NDVI y NDSI, (Figuras 2 y 3), se observó una gran variabilidad temporal en cada uno de estos. La estimación de la evolución temporal de la cobertura glaciar en el área de estudio (km²), basada en ambos índices muestra una disminución de las superficies glaciares según lo que se clasificó como hielo glaciar (Figuras 4 y 5).

Basado en el análisis de NDVI, una disminución de superficies glaciares de 1.1 km² (-28.2%) durante el primer período (1999-2009) fue observada, mientras que para el segundo período entre el año 2009 y 2019 la disminución observada fue de 2.2 km², es decir -78.6% respecto al primer período (Figura 5). Entre el año 1999 y 2019 se calculó una disminución de 3.3 km², (-84.6%) en la superficie de los glaciares del área de estudio.

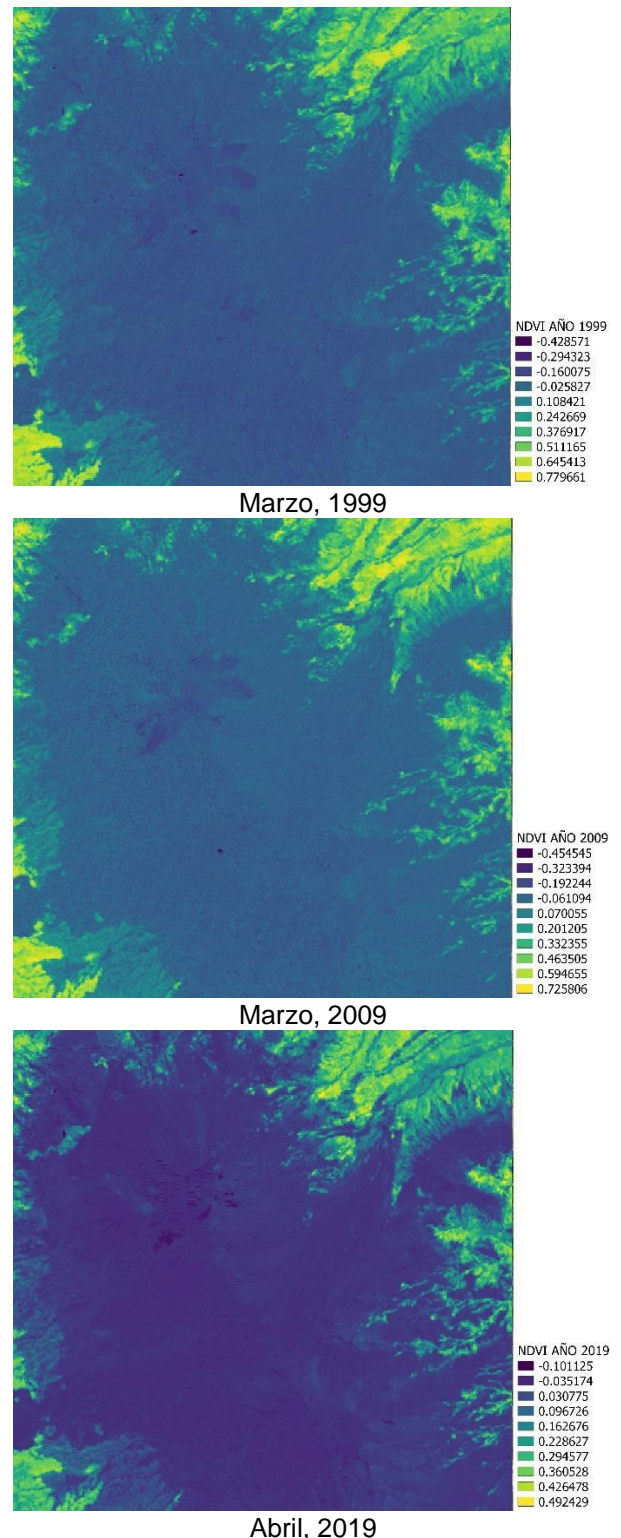


Figura 2: Variación temporal del NDVI durante el período 2009-2019.

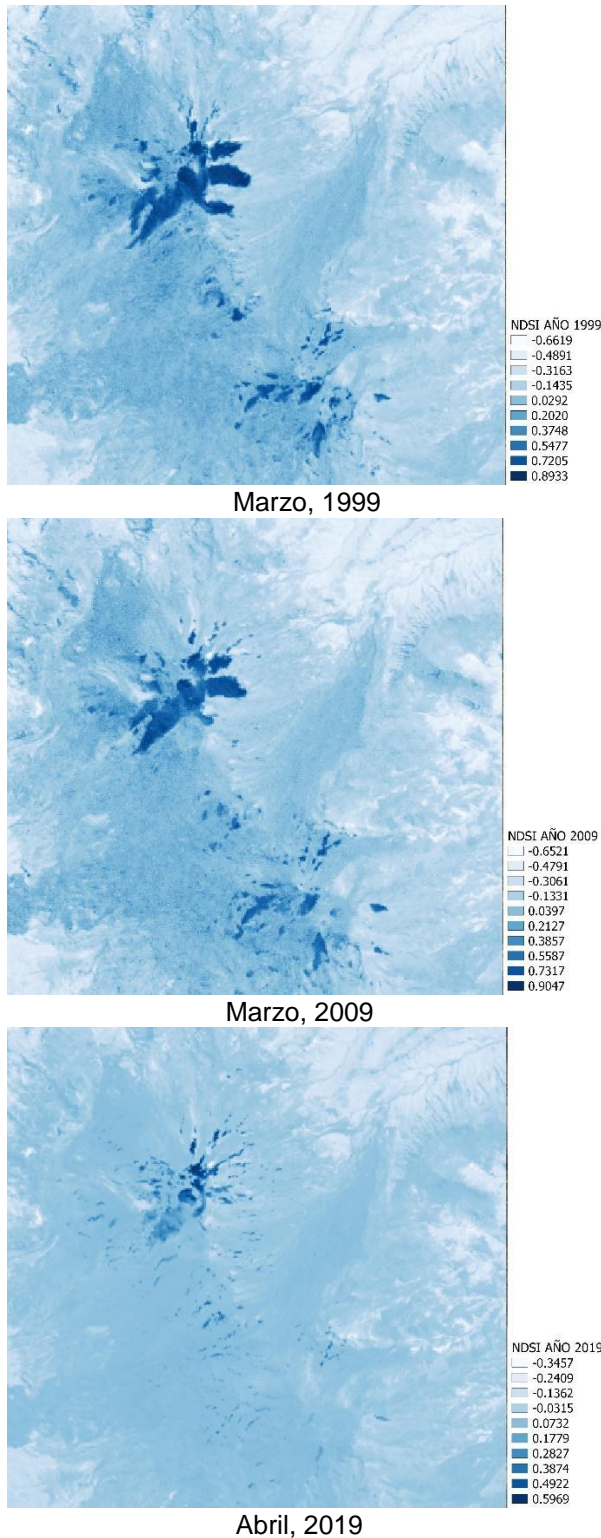


Figura 3: Variación temporal de la superficie glaciar basada en NDSI durante el período 2009-2019.

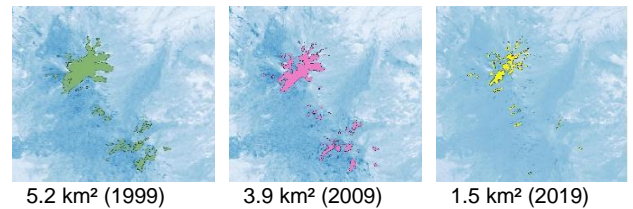


Figura 4: Superficies (Km²) en los tres años seleccionados basado en el índice NDSI. En verde se representa la superficie glaciar de marzo de 1999, en rosado la superficie glaciar de marzo de 2009 y en amarillo la superficie glaciar para abril de 2019.

Utilizando el NDSI se obtuvo una condición de disminución mucho más precisa de superficies glaciares (basados en el análisis de la Figura 2), lo que arrojó una disminución de 1.3 km², es decir, un 25% menos en el primer intervalo de tiempo. Para el segundo intervalo de tiempo se observó una disminución de 2.4 km², es decir un 61.5% (Figura 6). El análisis a partir de NDSI, indica una disminución de un 71.2% en las superficies glaciares del área de estudio para el período 1999-2019.

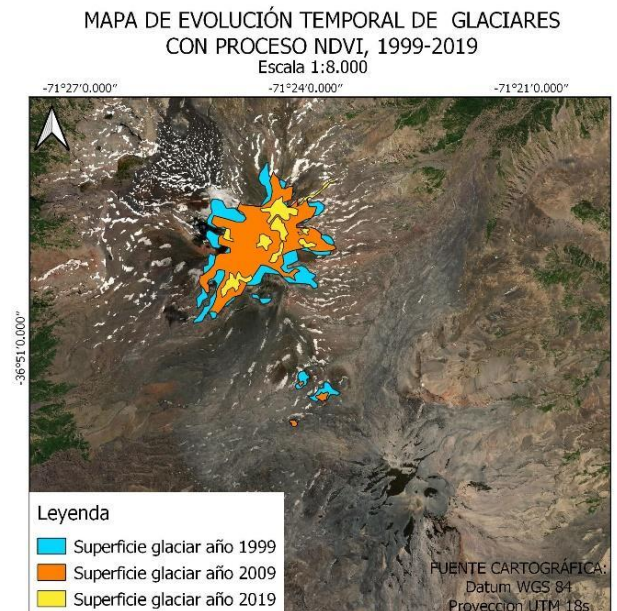


Figura 5: Disminución interanual en la superficie glaciar basados en NDVI durante el período 2009-2019.

La variabilidad temporal de ambas variables meteorológicas podría evidenciar la influencia climática sobre la disminución de la cobertura de nieve en el Complejo Volcánico Nevados de Chillán. Desde el año 2009 la precipitación mensual se muestra en la estación meteorológica. Las Trancas (Figura 1) una disminución desde valores de 1100 mm (invierno-2000) hasta valores inferiores a 200 mm (primavera-2019) mostrando una clara tendencia negativa (Figura 7, línea azul). Los valores de temperatura mensual en Bernardo O'Higgins (Figura 1), señalan idéntico patrón interanual, con valores promedio de ~ 15°C a inicios del año 2000 y temperatura promedio de ~ 13.5°C hacia finales de 2019, donde las temperaturas de otoño e invierno (mínimas) y verano (máximas) han incrementado durante los últimos 20 años (Figura 7, línea roja).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación coinciden con lo observado por Caro (2014), quien determinó una disminución de un 63.6% de cobertura glaciar en el Complejo Volcánico Nevados de Chillán entre los años 1978-2011, considerando el aumento de las temperaturas y la disminución en las precipitaciones en el área de estudio como principales forzantes de este proceso. Asimismo, Díaz (2018) determinó la disminución de todos los glaciares analizados en las cuencas de Vodudahüe y Cahuelmó durante el período 1985-2017 utilizando imágenes de los sensores TM y OLI/TIRS respectivamente observándose una tendencia negativa de la cobertura glaciar a ritmos variables entre sí. Tal como ha ocurrido con gran parte de los glaciares de la zona sur y austral del país (Rivera et al., 2012a), la presente investigación demostró la tendencia a la disminución y su relación con los efectos del cambio climático. Sin embargo, el aporte de las erupciones volcánicas de este complejo, activo desde 640 mil años (Dixon et al., 1999) deben ser consideradas en futuros trabajos de modelamiento de retroceso glaciar. Especial consideración se debe tener con la deposición frecuente de cenizas y los flujos de lava que pueden también ser responsables de la contracción del área glaciar. Sin embargo, si el aporte de ceniza volcánica no es suficiente, estas pueden incluso provocar el crecimiento de la cobertura glaciar aislando el hielo de la radiación solar directa, reduciendo así la

ablación (Adhikary et al., 2002). Entonces para diferenciar el efecto del clima y actividad volcánica sobre el retroceso glaciar, se requiere, de acuerdo a Rivera et al (2006) analizar volcanes separados, con historias y comportamientos eruptivos recientes distintivos y diferentes.

De acuerdo a los antecedentes que entrega el Servicio Nacional de Geología y Minería-SERNAGEOMIN, la actividad volcánica en este complejo turístico han sido reportadas durante tres períodos: 1861-1865, 1906-1948 y 1973-1986, lo cual nos permite inferir que procesos relacionados con esta actividad no han influenciado, al menos durante el período 1999-2019 en el retroceso glaciar en el Complejo Volcánico Nevados de Chillán. Sin embargo, como muestra esta investigación, el análisis de series de tiempo de variables meteorológicas pueden ser considerados una primera aproximación para el monitoreo de cambio de cobertura glaciar.

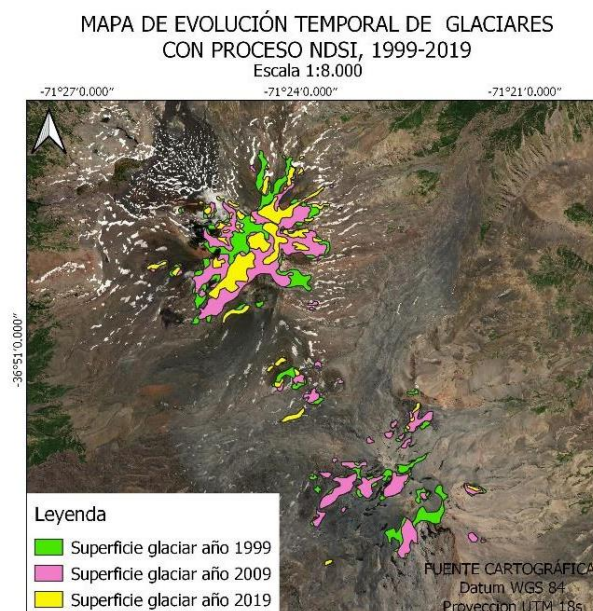


Figura 6: Disminución interanual en la superficie glaciar basados en NDSI durante el período 2009-2019.

Mediante el uso de estos dos índices ambientales para la determinación de masas de hielo glaciar en la superficie terrestre se obtuvieron distintas precisiones, por lo que se tomó como resultado más aproximado al obtenido con el NDSI, debido a

que este índice utiliza las bandas 2 y 5 para el sensor TM y 3 y 6 para el sensor OLI. Actualmente, estudios relacionados al cálculo de superficies glaciares se realizan utilizando este índice, debido a las bandas espectrales que componen la ecuación permiten identificar píxeles donde la cobertura glaciar emite su mayor reflectancia (Alonso y Moreno, 1996, Recio y Cano, 2004; Copé de los Mozos, 2012; Pitte, et al., 2009). Además, el uso de índices de vegetación para estudios de cambios de cobertura glaciar ha sido utilizado como un complemento para poder determinar masas de agua que se encuentren insertas en las áreas de estudio (Kaab, 2006).

En cuanto a las dos variables meteorológicas analizadas, las tendencias observadas (ambas negativas) sugieren un efecto climático que contribuye a la aceleración del derretimiento de los glaciares (Rabassa, 2011), proceso que de mantenerse las siguientes décadas podría llegar a extinguir los glaciares del área de estudio y perder una de las reservas de agua dulce más grandes en la región de Ñuble Larrain, 2007). Rivera et al (2002) señalan que en el distrito de Lagos Chilenos (37°S - 41°S) el retroceso y derretimiento de masa glaciar podría responder a la tendencia negativa del régimen de precipitaciones y al calentamiento atmosférico observado desde la segunda mitad del siglo XX

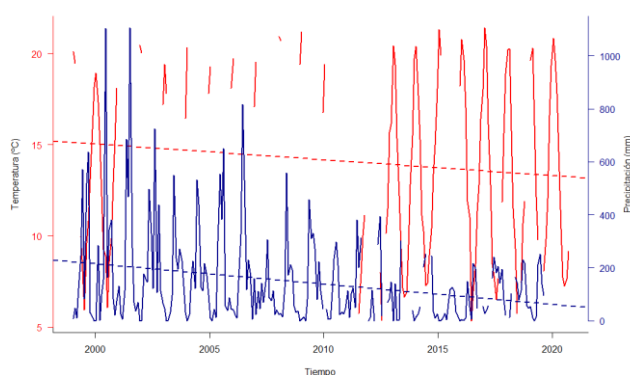


Figura 7: Variación temporal de la temperatura (°C) en la estación Bernardo O' Higgins (línea roja) y precipitaciones (mm) en la estación Las Trancas (línea azul) para el período 1999-2019. Las líneas indican la tendencia temporal para ambas variables. Los datos fueron obtenidos desde el explorador climático del CR2 (disponibles en <http://explorador.cr2.cl/>)

Finalmente, esta investigación sugiere realizar estudios que combinen datos remotos con datos *in situ* con el fin de obtener una mayor precisión de las estimaciones y resultados para apoyar, la gestión y manejo de ecosistemas en riesgo ambiental.

REFERENCIAS

- Adhikary, S., Yamaguchi, Y., & Ogawa, K. (2002). Estimation of snow ablation under a dust layer covering a wide range of albedo. *Hydrological Processes*, 16(14), 2853-2865.
- Alonso, C., & Moreno, V. (1996). Análisis multitemporal de imágenes LANDSAT TM en la cartografía de las masas de hielo y nieve aplicada a la modelización hidrológica. *Revista de Teledetección*, 7, 35-47.
- Bajracharya, S. R., Maharjan, S. B., & Shrestha, F. (2014). The status and decadal change of glaciers in Bhutan from the 1980s to 2010 based on satellite data. *Annals of Glaciology*, 55(66), 159-166.
- Bown, F., Rivera, A., & Acuña, C. (2008). Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, 48, 43-48.
- Bustos Cares, D. (2018). Monitoreo del Complejo Volcánico Nevados de Chillán con base en observaciones InSAR (Doctoral Dissertation, Universidad de Concepción).
- Cárcamo, A. M., & Ayuga, J. G. R. (2015). Análisis multitemporal mediante teledetección espacial y SIG del cambio de cobertura del suelo en el municipio de Danlí, El Paraíso, en los años 1987-2011. *Ciencias Espaciales*, 8(2), 259-271.
- Caro Paredes, D. A. (2014). Estudios glaciológicos en los Nevados de Chillán.
- Cook, A. J., Holland, P. R., Meredith, M. P., Murray, T., Luckman, A., & Vaughan, D. G. (2016). Ocean forcing of glacier retreat in the western Antarctic Peninsula. *Science*, 353(6296), 283-286.
- Corrales Andino, R., & Ochoa López, V. (2017). Cálculo de reflectancia en imágenes Landsat OLI-8, sobre la región central de Honduras, mediante software libre SEXTANTE. *Ciencias Espaciales*, 9(1), 81-96.

- Copé de los Mozos, R. "Cálculo del retroceso glaciar en la isla de Livingston y de su línea de costa para la actualización de cartografía". Valencia-España, Máster en Tecnologías de Información Geográfica, 2012, p.9.
- Díaz Bravo, C. (2018). Análisis de variaciones areales de los glaciares ubicados en las cuencas de Vodudahúe y Cahuelmó durante el período 1985-2017.
- Dirección General de Aguas & Centro de Estudios Científicos, DGA-CECs. (2011). Variaciones Recientes de Glaciares en Chile según principales Zonas glaciológicas. (Informe S.I.T. N°261). Ministerio de Obras Públicas. República de Chile.
- Dirección General De Aeronáutica Civil, (2019). Recuperado de: <http://www.meteochile.cl>
- Dixon, H. J., Murphy, M. D., Sparks, S. J., Chávez, R., Naranjo, J. A., Dunkley, P. N., ... & Pringle, M. R. (1999). The geology of Nevados de Chillán volcano, Chile. *Revista Geológica de Chile*, 26(2), 227-253.
- Falvey, M., & Garreaud, R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D4).
- Gómez, C. L., Maldonado, J. R., & Rojas, M. J. G. (2015). Permeabilidad del suelo de la cuenca del río Chillán, entre Estero Peladillas y río Ñuble, Chile. *Cuadernos de Geografía-Revista Colombiana de Geografía*, 24(1), 73-86.
- Huayaney, M. E. A., & de la Cruz, J. F. M. (2009). Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciar en la Cordillera Blanca. *Investigaciones Sociales*, 13(22), 71-83.
- Jakobsson, M., Ingólfsson, Ó., Long, A. J., & Spielhagen, R. F. (2014). The dynamic Arctic. *Quaternary Science Reviews*, 92, 1-8.
- Kääb, A., Huggel, C., & Fischer, L. (2006). Remote sensing technologies for monitoring climate change impacts on glacier- and permafrost-related hazards. In *Geohazards*, F. Nadim, R. Pöttl, H. Einstein, H. Klapperich and S. Kramer (Eds.), ECI Symposium Series, Vol. P07, 2006. Available online at: <http://services.bepress.com/eci/geohazards/2>
- Khromova, T. E., Osipova, G. B., Tsvetkov, D. G., Dyurgerov, M. B., & Barry, R. G. (2006). Changes in glacier extent in the eastern Pamir, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery. *Remote Sensing of Environment*, 102(1-2), 24-32.
- Kozhikkodan Veetil, B., Pereira, S., Wang, S., Valente, P., Grondona, A., Rondón, A., Rekowsky, I., de Souza, S., Bianchini, N., Bremer, U., & Simões, J. (2016). Un análisis comparativo del comportamiento diferencial de los glaciares en los Andes Tropicales usando teledetección. *Investigaciones Geográficas*, (51), 3-36.
- Kruse, F. A. (2004). Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO. In *Summaries of 13th JPL Airborne Geoscience Workshop*, Jet Propulsion Lab, Pasadena, CA.
- Lara, C., Saldías, G., Paredes, A., Cazelles, B., & Broitman, B. (2018). Temporal variability of MODIS phenological indices in the temperate rainforest of Northern Patagonia. *Remote Sensing*, 10(6), 956.
- Larraín, S. (2007). Glaciares chilenos: Reservas estratégicas de agua dulce. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 23(3), 28-35.
- Malmros, J. K., Mernild, S. H., Wilson, R., Tagesson, T., & Fensholt, R. (2018). Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016). *Remote Sensing of Environment*, 209, 240-252.
- Naranjo, J. A., Gilbert, J. S., & Sparks, R. S. J. S. (2008). Geología del complejo volcánico Nevados de Chillán, Región del Biobío. Servicio Nacional Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, mapa escala 1: 50,000, Santiago.
- Nicholson, L., Marín, J., Lopez, D., Rabatel, A., Bown, F., & Rivera, A. (2009). Glacier inventory of the upper Huasco valley, Norte Chico, Chile: glacier characteristics, glacier change and comparison with central Chile. *Annals of Glaciology*, 50(53), 111-118.

- Olave-Solar, C., Santana, A., Butorovic, N., & Acuña, P. (2008). Variabilidad térmica en la región nororiental de la península de Brunswick, Magallanes, Chile, empleando datos Landsat. In *Anales del Instituto de la Patagonia* (Vol. 36, No. 2). Universidad de Magallanes. 5-12.
- Orozco, G.; Jara, G.; Bertin, D. 2016. Peligros del Complejo Volcánico Nevados de Chillán, Región del Biobío. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 28: 34p., 1 mapa escala 1:75.000, Santiago.
- Pitte, P., Ferri Hidalgo, L., & Espizúa, L. E. (2009). Aplicación de sensores remotos al estudio de glaciares en el Cerro Aconcagua. In *Anais XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 1473-1480.
- Pulgarín, B., Cardona, C. E., Santacoloma, C. C., Agudelo, A., Calvache, M. L., & Monsalve, M. L. (2008). Erupciones del Volcán Nevado del Huila, en Febrero y Abril de 2007, y los cambios en su masa glaciar. *Boletín Geológico*, (42), 109-128.
- Rabassa, J. O. (2011). El impacto del cambio climático en los glaciares patagónicos y fueguinos. In *III Congreso Internacional sobre Cambio Climático y Desarrollo Sustentable (La Plata, 2011)*.
- Recio, J. R., & Cano, I. C. M. (2004). Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (4), 13.
- Reinthal, J., Paul, F., Granados, H. D., Rivera, A., & Huggel, C. (2019). Area changes of glaciers on active volcanoes in Latin America between 1986 and 2015 observed from multi-temporal satellite imagery. *Journal of Glaciology*, 65(252), 542-556.
- Rivera, A., & Casassa, G. (2002). Ice thickness measurements on the Southern Patagonia Icefield. In *the Patagonian Icefields*. Springer, Boston, MA, 101-115.
- Rivera, A., Bown, F., Mella, R., Wendt, J., Casassa, G., Acuña, C., ... & Brock, B. (2006). Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile. *Annals of Glaciology*, 43, 111-122.
- Rivera, A., Bown, F., Wendt, A., & Bravo, C. (2012a). Recent glacier changes in Southern Chile and in the Antarctic Peninsula. In *Anales del Instituto de la Patagonia*. Universidad de Magallanes.
- Rivera, A., Bown, F., Carrión, D., & Zenteno, P. (2012). Glacier responses to recent volcanic activity in Southern Chile. *Environmental Research Letters*, 7(1), 014036.
- Rivera, A., & Bown, F. (2013). Recent glacier variations on active ice capped volcanoes in the Southern Volcanic Zone (37°–46° S), Chilean Andes. *Journal of South American Earth Sciences*, 45, 345-356.
- Stroeve, J. C., Serreze, M. C., Holland, M. M., Kay, J. E., Malanik, J., & Barrett, A. P. (2012). The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis. *Climatic Change*, 110(3-4), 1005-1027.
- USGS, 2019. Recuperado de: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.