

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**¿LOS EFECTOS CLIMÁTICOS SON EL PRINCIPAL IMPULSOR DEL
RETROCESO GLACIAR EN CHILE CENTRAL?**

KARINA VALLEJOS¹
LINA CASTRO¹
ALVARO OSSANDON¹
RAUL FLORES¹
FRANCISCO CERECEDA-BALIC²

RESUMEN

En la Cordillera de los Andes, especialmente en la Cuenca del Río Maipo, los glaciares se han consolidado como la principal fuente de recursos hídricos. Sin embargo, desde mediados del siglo XX, muchos glaciares en la región central andina han retrocedido. Junto con esto, ha habido una larga sequía conocida como Megasequía desde 2010. A pesar de estas condiciones, glaciares ubicados en las mismas franjas climáticas y con idénticas características geomorfológicas, exhiben tasas de derretimiento considerablemente distintas. Este fenómeno de retroceso glaciar plantea una serie de incógnitas respecto a sus causas y factores contribuyentes como cambio climático y efectos de contaminación local. El objetivo radica es discernir si la reducción de área glaciar en años recientes se atribuye a un efecto climático o si los efectos de la contaminación local también están acelerando esa ablación. Para esto se aplica un enfoque estadístico en dos glaciares de cuenca Maipo: Glaciar Paloma Oeste (GPO), con alta contaminación de Carbono Negro, y Glaciar Bello (GB), menos contaminado. Se comparan dos periodos: antes y después de 2010, cuando comenzó la Megasequía, la cual ha afectado enormemente la zona. Se usa un modelo de regresión para predecir el área glaciar a partir de variables de temperatura, precipitación, índices climáticos (PDO y Niño 3.4) y Carbono Negro. Los resultados muestran que, durante la Megasequía, los efectos climáticos son la principal causa de la disminución de área glaciar, tanto en GPO como en GB. Sin embargo, la contaminación tiene un impacto significativo en GPO (31% del derretimiento). Esto explica las tasas de derretimiento diferentes. En GPO, antes de 2010, el 47% del retroceso se atribuía al clima, aumentando al 69% durante la Megasequía. En GB, antes de 2010, el 95% del retroceso era por el clima, incrementándose al 99% después de 2010.

¹ Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María.

² CETAM, Universidad Técnica Federico Santa María

1. INTRODUCCIÓN

La Cordillera de los Andes, con un enfoque particular en la Cuenca del Río Maipo, alberga glaciares que se han consolidado como una fuente esencial de recursos hídricos. Sin embargo, a lo largo del siglo XX, muchos de estos glaciares en la región central andina han experimentado un retroceso notable (Le Quesne et al., 2009; Farías-Barahona et al., 2019; Masiokas et al., 2020). Acompañando este fenómeno, la Megasequía, una sequía prolongada que se ha manifestado desde 2010, ha tenido un impacto significativo en la región. A pesar de estas circunstancias, glaciares que comparten zonas climáticas similares y características geomorfológicas idénticas, presentan tasas de derretimiento notablemente diferentes. Esta variabilidad en el retroceso glaciar presenta un enigma en torno a sus determinantes subyacentes, por lo que diversos autores han explorado tanto la influencia del cambio climático como los efectos potenciales de la contaminación local (Cereceda-Balic et al., 2018; Ming et al., 2009; S. Kang et al., 2020). La contaminación, en particular, ha emergido como un factor de particular interés en la relación con los glaciares. Estudios han identificado la presencia de carbono negro (BC, black carbón) y partículas suspendidas (MP, materia particulada) provenientes de actividades antropogénicas cercanas a las áreas glaciares. En específico, el BC se categoriza como material particulado sedimentable, generado como subproducto de la combustión incompleta. Este componente origina oscurecimiento en la superficie de la nieve, aumentando las tasas de fusión (Gul et al., 2021; Jenkins et al., 2016). En Chile, Cereceda-Balic et al. (2022) llevó a cabo un estudio comparativo entre dos glaciares, Glaciar Bello (GB) y Olivares Alfa (GOA), ubicados en la Cuenca Maipo y que comparten características geomorfológicas similares. Los resultados revelaron que GOA, que experimenta un mayor retroceso glaciar, presenta una mayor concentración de BC en su superficie. En contraste, GB, con una menor concentración de BC, muestra una menor tasa de retroceso glaciar. Estos hallazgos evidencian una clara asociación entre el BC y el retroceso glaciar, con glaciares exhibiendo diferentes tasas de retroceso a pesar de sus similitudes geomorfológicas. Además, se identificó que la actividad minera ubicada a solo 7 km del Glaciar Olivares Alfa podría explicar la presencia de BC en la zona. A partir de esto, el objetivo radica es discernir si la reducción de área glaciar en años recientes se atribuye a un efecto climático o si los efectos de contaminación también están acelerando esa ablación. Este estudio se enfoca en dos glaciares específicos de la cuenca Maipo: el Glaciar Paloma Oeste (GPO), caracterizado por una alta presencia de carbono negro (cercano a GOA), y el Glaciar Bello (GB), con niveles de contaminación de BC bajos. A través de la comparación de su evolución antes y después de 2010, marcando el inicio de la Megasequía, se propone evaluar los efectos del retroceso glaciar en un contexto de sequía extrema y contaminación, cuantificando el recurso hídrico perdido por efectos climáticos y de contaminación en los últimos 20 años.

2. ZONA DE ESTUDIO Y MÉTODOS

2.1 Zona de estudio

La zona de estudio es cuenca Maipo (Figura 1) debido a la importancia hídrica de los glaciares, ya que, en época estival la escorrentía es principalmente por aporte glaciar, siendo

alrededor del 55% en los meses de verano durante los años de actual sequía (2010-2016; Ayala et al.,2020). La cuenca Rio Maipo presenta un clima templado de tipo mediterráneo con estación seca prolongada y frío de altura en la Cordillera de Los Andes, donde las temperaturas máximas se alcanzan en los meses de verano y las precipitaciones se concentran en los meses de invierno. Entre 1961 y 2022 la temperatura en la zona alta de la cuenca Maipo ha aumentado $+0.3^{\circ}\text{C}$ por década, el doble de la tendencia de aumento promedio nacional de $+0.15^{\circ}\text{C}$ (DGA, 2022). La precipitación anual en cuenca Maipo ha disminuido aproximadamente un 15% por década entre 1961-2022 (DGA, 2022). Con respecto a la hidrología, la cuenca presenta un régimen hidrológico mixto, recibiendo aportes en la zona baja directamente por precipitación y aportes por derretimiento nival y glaciar en las zonas altas de la cuenca.

Se analizan dos glaciares específicos de cuenca Maipo en el presente estudio. Para seleccionarlos, se consideraron características como su clasificación, altitud media, orientación de la zona de acumulación (OACC), orientación de la zona de ablación (OABL) y orientación general del glaciar (Tabla 1). El primer cuerpo de hielo analizado es Glaciar La Paloma Oeste (GPO), mientras que el segundo cuerpo de hielo es Glaciar Bello (GB), ubicados a 48.2 km de distancia entre ellos. Ambos glaciares se encuentran ubicados en la misma zona climática, presentan características morfológicas similares, pero han experimentado retrocesos glaciares significativamente diferentes en los últimos años.

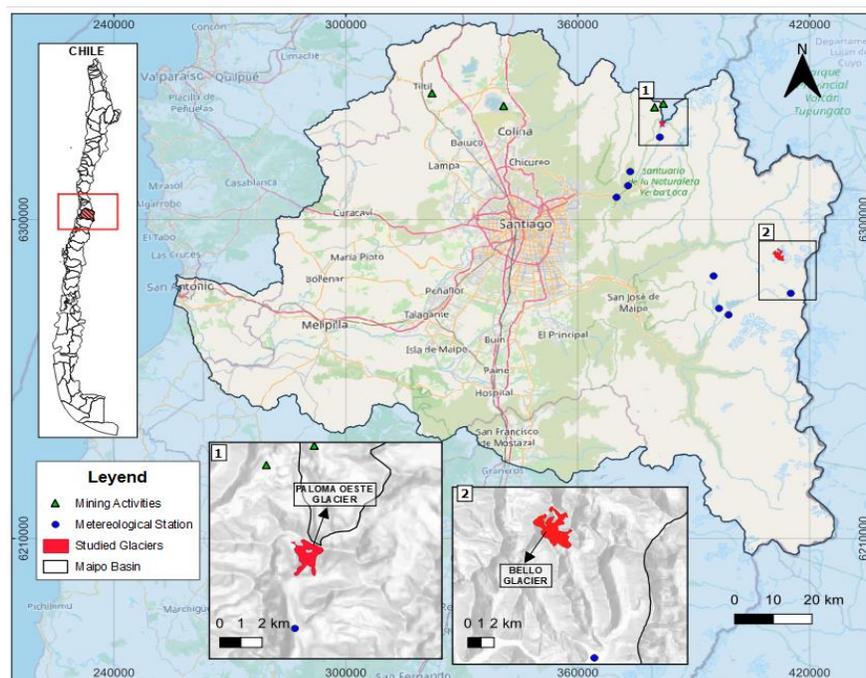


Figura 1: Cuenca Maipo, glaciares estudiados, estaciones meteorológicas y ubicación de industrias mineras en alta montaña.

Tabla 1: Características geomorfológicas de Glaciar Bello y Glaciar La Paloma Oeste, donde H_{min} , H_{ave} y H_{max} son las altitudes mínimas, máximas y medias en m.s.n.m, respectivamente. Además, OACC es la orientación de la zona de acumulación, OABL es la orientación de la zona de ablación, Pendiente es la pendiente del glaciar y Orientation es la orientación general del glaciar.

Name	Types of glaciers	Basin	Subsubbasin	H_{min}	H_{ave}	H_{max}	OACC	OABL	Orientation	Slope
-	-	-	-	[masl]	[masl]	[masl]	-	-	-	[°]
GB	Mountain glacier	Rio Maipo	Rio Yeso	3987	4439	4917	SSE	SSE	S	17.6
GPO	Mountain glacier	Rio Maipo	Rio San Francisco	3704	4405	4887	S	SW	S	30.0

2.2 Base de datos

Se determinan las posibles causas que influyen en el retroceso glaciar de la zona Central de Chile según la literatura, donde se identifican variables para representar cambio climático (temperatura y precipitación), variable de contaminación por carbono negro (BC) y variables de variabilidad climática (índices macroclimáticos como el Niño 3.4 y PDO). Además, se estudia el tiempo en que demora cada una de estas variables en influir en la zona de estudio. Todas las series anteriormente mencionadas se analizan entre los años hidrológicos 2000 a 2020.

2.2.1 Imágenes Satelitales

Se utilizan 22 imágenes satelitales Landsat TM, ETM+ y OLI/TIRS (Landsat 5, 7 y 8, respectivamente) entre los meses de diciembre y abril descargadas desde el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), con el fin de obtener las series de tiempo anuales de superficie glaciar entre los años hidrológicos 2000 y 2020. Se utilizan imágenes del periodo estival, ya que, se busca el periodo con menor cantidad de nieve estacional.

La superficie glaciar se obtiene calculando el índice diferencial normalizado de nieve (NDSI). Se considera que el índice NDSI detecta nieve cuando adquiere un valor mayor a 0.4 (Dozier, 1989). Cabe mencionar, que para el año 2012 se utilizan dos imágenes Landsat ETM+ 7 para corregir el problema SCL-off (Striping Noise Correction Loss-off) por medio del método planteado por Chen et al. (2011). Este problema ocurrió desde mayo de 2003 debido a una falla en el escáner término del sensor.

2.2.2 Registros meteorológicos

Para evaluar el efecto del cambio climático se analizan las series de tiempo de precipitación y temperatura en cada cuerpo de hielo analizado durante los años de estudio (2000-2020). Específicamente, se utiliza la serie de tiempo de precipitación acumulada durante cada año hidrológico, realizando una extrapolación desde la altitud de las estaciones meteorológicas consideradas a la altitud media de cada glaciar analizado. Se utiliza como estación meteorológica base “Yeso Embalse” y “Estero Yerba Loca antes Junta San Francisco” para los glaciares GB y GPO, respectivamente. Por otro lado, con respecto a la temperatura, se analiza la cantidad de días del año hidrológico en que la temperatura promedio diaria es menor o igual a 0°C (en la altitud media del glaciar). Para obtener esta serie de tiempo, se calcula la temperatura promedio diaria de las estaciones meteorológicas bases de cada glaciar

analizado y se extrapola a la altitud media de los glaciares analizados. Para el relleno de datos y generar las extrapolaciones, se emplean seis estaciones meteorológicas ubicadas en las proximidades de GPO y GB: las estaciones "Portezuelo Echaurren", "Termas Del Plomo", "Laguna Negra", "Glaciar Olivares Alfa", "Estero Yerba Loca en Piedra Carvajal", y "Valle Olivares". Este análisis se basa en la combinación de datos recopilados en glaciares, junto con información proveniente de múltiples estaciones meteorológicas, lo que resulta en series temporales de precipitación y temperatura confiables y representativas de los glaciares de interés.

2.2.3 Índices macroclimáticos

Con respecto a los índices macroclimáticos analizados, se estudia el efecto del índice niño 3.4 y PDO en el retroceso glaciar de GB y GPO. Además, se analiza el tiempo de desfase en que estos fenómenos macroclimáticos influyen en la zona de estudio. En base a los hallazgos presentados por Escobar (1998) y Masiokas (2006), los cuales estudian la influencia de PDO y Niño 3.4 en la Zona Central de Chile, se utiliza para este estudio el promedio entre mayo y septiembre (periodo invierno) para el índice Niño 3.4 y el promedio entre agosto y octubre (periodo primavera) para el índice PDO. Los datos de los índices macroclimáticos analizados en este estudio son obtenidos desde la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA)(<http://psl.noaa.gov>).

2.2.4 CAMS

Se analiza la serie de tiempo de Carbono Negro (BC) depositado obtenida desde The Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS; <https://atmosphere.copernicus.eu/>), parte del programa Copernicus y como predecesor del proyecto MACC-III (Monitoring Atmospheric Composition Atmosphere Service; Flemming et al., 2017; Granier et al., 2019). Cabe mencionar que CAMS entrega valores de BC depositado en unidades de teragramos [Tg] o flujo de deposición en unidades de [$\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$], además entrega valores grillados con resolución espacial de 0.1° y resolución temporal mensual. Sin embargo, para representar cada año en estudio, se calcula un BC promedio anual. En el presente estudio se trabaja la serie de tiempo de BC depositado por unidad de área, es decir, el BC depositado dividido en el área del píxel del producto grillado.

Pese a que en Chile no hay información de BC depositado en la resolución temporal requerida para calibrar la serie de tiempo. Investigaciones anteriores compararon esta base de datos con datos medidos en terreno. Vignesh et al. (2020) compara los valores de BC de CAMS con los obtenidos a través de MERRA2-BC y mediciones en terreno realizadas en la ciudad de Dehradun en India, lugar con concentración de BC similar a las encontradas en GPO. En general, se observó una buena correlación ($r=0.80$) entre la media mensual de BC medida en terreno y MERRA2-BC. De manera similar, los valores mensuales de CAMS-BC mostraron una buena correlación ($r=0.89$) en comparación con la media mensual de BC en tierra. Por otro lado, Vignesh et al. (2020) comparó los valores medios anuales entre octubre 2017 y septiembre 2018, donde se obtiene que CAMS subestima en 1.6 veces el valor medido, mientras que MERRA subestima en 6.6 veces al valor medido. Estudios han indicado que los productos de aerosoles derivados de MERRA mostraron subestimaciones

de aerosoles carbonáceos en varias ubicaciones en todo el mundo, principalmente debido a inexactitudes en las estimaciones del inventario de emisiones antropogénicas (Bali et al., 2017).

3. METODOLOGÍA

En primer lugar, se ajusta un modelo de regresión multivariable por cada cuerpo de hielo analizado, es decir dos modelos de regresión. En general, se relaciona el área glaciar como variable dependiente con variables de precipitación acumulada en el año hidrológico, cantidad de días con temperatura menor a 0°C, Niño 3.4, PDO y concentración de BC como variables independientes. Con esto se evalúa la contribución de cada variable al cambio de superficie glaciar. Los modelos ajustados tienen la forma presentada en la Ecuación 1.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon \quad (1)$$

Donde y es la respuesta, X_1, X_2, \dots, X_k son los regresores, los parámetros $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ son los coeficientes de regresión y ε es el residuo o error entre el valor modelado y observado. Para elegir las variables explicativas, se utilizan los criterios de BIC (Ghosh et al., 2006), los cuales evalúan tanto la capacidad del modelo para ajustarse a los datos, como la complejidad inherente del propio modelo, lo que conduce a la identificación de las variables explicativas que logran un óptimo ajuste en el modelo. Para comprobar los supuestos de un modelo de regresión multivariable, se realiza un análisis de normalidad de residuos con test Shapiro-Wilk, análisis de varianza por medio del factor de inflación de varianza (VIF; Alin, 2010) y se comprueba la no correlación de residuos continuos con test Durbin-Watson y Breusch Godfrey. Además, la varianza de los residuos debe ser constante en todo el rango de observaciones, es decir, debe haber homocedasticidad, para lo que se utiliza prueba Breusch-Pagan. Finalmente, para validar el modelo se realiza una validación cruzada Leave One Out Cross-Validation (LOOCV) (Burman et al., 1989) entre los años analizados.

Se emplea el modelo de regresión para cuantificar el retroceso glaciar tanto previo como durante el periodo de Megasecuía (2010-2020) en función de cada causa analizada. Estas causas incluyen el impacto del cambio climático (temperatura y precipitación), la variabilidad climática (Niño 3.4 y PDO) y la influencia de la contaminación por BC, para cada glaciar bajo estudio.

4. RESULTADOS

4.1 Retroceso Glaciar

La Figura 2 muestra la variación espacial de GB y GPO desde el año hidrológico 2000 al 2020. GPO en el año 2000 contaba con una superficie de 1.33 [km²], la cual se redujo anualmente en promedio a una tasa de 2.1% entre el periodo 2000-2020, mientras que el GB contaba con un área de 4.21 [km²] el año 2000 y redujo su superficie en promedio 0.6% anualmente entre el 2000-2020.

Con el fin de analizar la tendencia de la superficie glaciar, se aplica test de Mann-Kendall a las series de tiempo de ambos cuerpos de hielo, obteniendo tendencia negativa (p-value <

0.05) con tau (τ) de -0.88 y -0.48 para GPO y GB, respectivamente. Por otro lado, con Pettitt Test se encuentra que GPO cambia de tendencia el año 2009 y GB el año 2010 (p -value < 0.05), lo que coincide con el periodo de Megasequía. Adicionalmente, se obtiene un coeficiente de correlación entre ambos glaciares de 0.77.

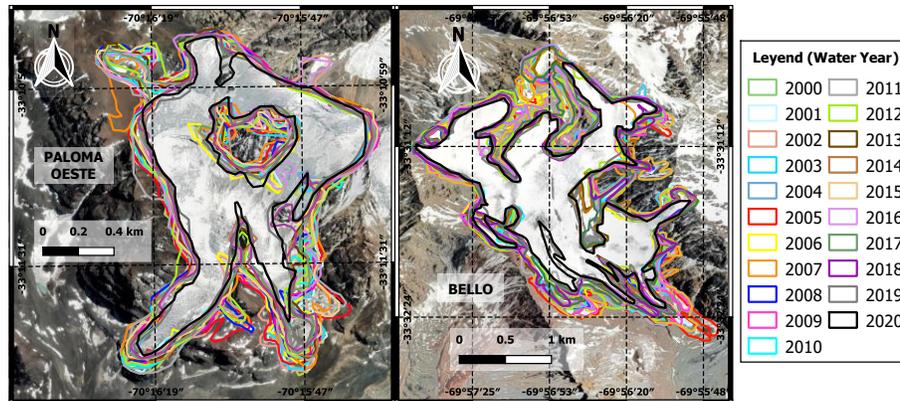


Figura 2: Variación espacial de la superficie glaciar desde el año hidrológico 2000 al 2020 de Glaciar Bello y Glaciar Paloma Oeste, obtenida mediante el análisis de imágenes satelitales Landsat TM, ETM+ y OLI/TIRS. (b) Área relativa respecto al año 2000 de ambos cuerpos de hielo analizados.

4.2 Modelos de regresión multivariable

Para elegir las variables dependientes del modelo, se analizan las correlaciones entre series de tiempo de causas de retroceso glaciar de cada cuerpo de hielo y su respectiva serie de tiempo de área glaciar. Se encuentra una alta correlación entre el área glaciar y la serie de contaminación de BC tanto para GB, como para GPO ($R^2 > 0.7$). Además, se visualiza una alta correlación entre precipitación y área glaciar ($R^2 > 0.7$) para ambos cuerpos de hielo y una correlación aceptable ($R^2 > 0.6$) entre superficie glaciar y variables climáticas y macroclimáticas. Cabe mencionar que este análisis es importante en la selección de los regresores para los modelos ajustados, lo cual se realiza utilizando el criterio BIC. Este criterio proporciona una medida de calidad relativa de un modelo estadístico y permiten la exclusión de las variables independientes estadísticamente no significativas (p -value > 0.05). El análisis BIC entregó que las variables significativas para incorporar a ambos modelos de regresión (GB y GPO) y asegurar un mejor ajuste, eran las variables de temperatura, precipitación, PDO, Niño 3.4 y BC.

La Figura 3.a y 3.b muestra los valores modelados utilizando los modelos de regresión lineal para GB y GPO, respectivamente, versus el área glaciar obtenida de imágenes satelitales. Los coeficientes de determinación R^2 obtenidos son 0.985 y 0.975 para GB y GPO, respectivamente. Esto indica que los modelos de regresión lineal utilizados son válidos para estimar el área glaciar debido a la fuerte correlación. La Figura 3.c y 3.d muestran los residuos de los modelos ajustados para GPO y GB, donde para ambos modelos los residuos son menores a 5%, sin embargo, para GB los errores son menores que para GPO. Esto ratifica que las predicciones de los modelos de regresión ajustan de manera cercana a los valores observados, por lo que las variables predictoras incluidas en los modelos capturan la variabilidad de los datos adecuadamente. Por otro lado, la Tabla 2 muestra la comprobación de supuestos para validar estadísticamente el modelo de regresión lineal, donde se comprueba

para ambos modelos ajustados, que no hay correlación entre los residuos de carácter lineal ni de segundo orden, que los residuos siguen una distribución normal y que hay homocedasticidad.

Tabla 2: Pruebas estadísticas para validar supuestos de modelos de regresión ajustados, se presenta el estadístico de prueba, p-value y el supuesto que se comprueba. Además, se muestra análisis VIF.

	GPO			GB		
	Test Statistic	P-value	Conclusion	Test Statistic	P-value	Conclusion
Durbin-Watson Test	d: 1.707	0.860	No correlation between the residuals (Linear)	d: 2.010	0.341	No correlation between the residuals (Linear)
Breush Godfrey Test	Lm: 1.843	0.123	No correlation between the residuals (No Linear)	Lm: 2.422	0.094	No correlation between the residuals (No Linear)
Shapiro Test	W: 0.9663	0.650	The residuals follow a normal distribution	W: 0.9548	0.418	The residuals follow a normal distribution
Breusch Pagan Test	BP: 7.4228	0.191	Residual variance is constant (Homoscedasticity)	BP: 3.7733	0.583	Residual variance is constant (Homoscedasticity)
Analysis	Values		Conclusion	Values		Conclusion
VIF Test	Niño 3.4: 1.331 PDO: 1.631 Precipitation: 1.609 Temperature: 1.267 BC: 1.906		There is not multicollinearity (VIF < 3)	Niño 3.4: 1.626 PDO: 1.632 Precipitation: 1.514 Temperature: 1.479 BC: 1.463		There is not multicollinearity (VIF < 3)

La Tabla 3 muestra los coeficientes de regresión (β) obtenidos al ajustar los modelos de regresión de GPO y GB. Estos modelos logran explicar el 89.5% de las causales de retroceso en el caso del glaciar La Paloma y el 89.9% en el caso del Glaciar bello, con un $\alpha \leq 5\%$ para ambos glaciares. Cabe mencionar que la validación de los modelos de regresión por el método LOOCV realizado para ambos glaciares, entrega que ningún valor influye significativamente en el modelo en comparación con otro.

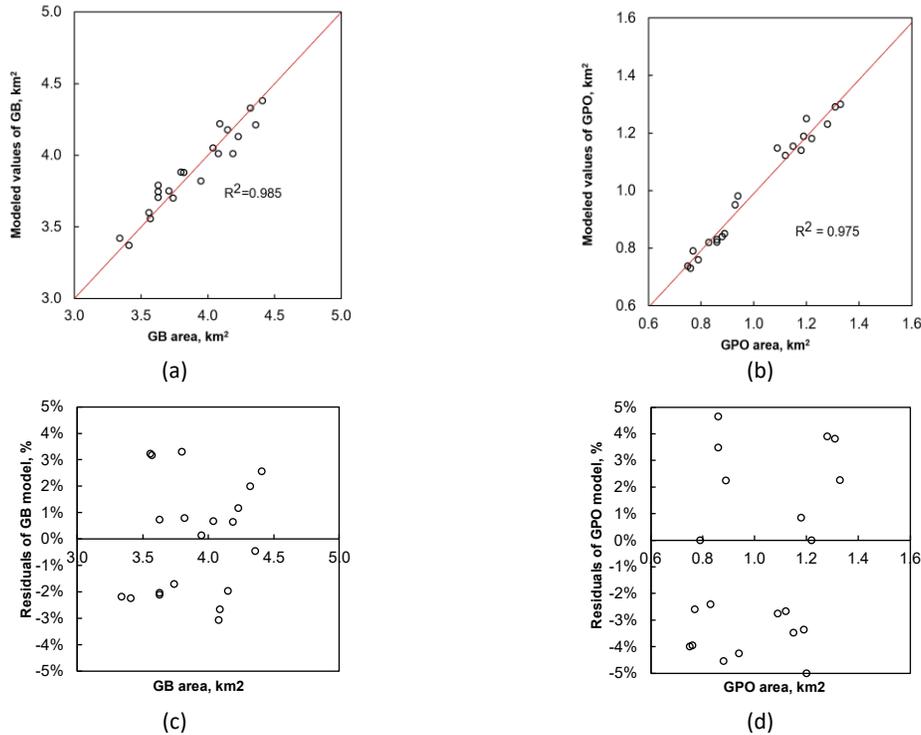


Figura 3: Valores ajustados mediante modelos de regresión multivariados versus valores de área de glaciares (valores sin estandarizar) (a) GB y (b) GPO. Además, se presenta los residuos del modelo de regresión ajustado para (c) GB, (d) GPO.

Tabla 3: Coeficientes Estandarizados del modelo de regresión multivariable ajustado. (*) Coeficientes significativos para el modelo ($R^2 > 0.6$ entre área glaciar y variable analizada).

	Temperature	Precipitation	Niño 3.4	PDO	BC	Intercept
	Regression coefficients					
GPO	0.0048*	0.0004*	0.0510*	-0.0367*	-0.0602*	1.2399*
GB	0.0112*	0.0007*	0.1983*	-0.0768*	-0.9136*	3.8610*

4.3 Efecto de Megasequía

Al restar la ecuación del modelo de regresión (Ecuación 1) entre dos años consecutivos, se releva la contribución individual de cada variable predictora analizada en las últimas dos décadas para ambos glaciares. Estos cálculos permitieron discernir el impacto específico de las variables, tanto climáticas como contaminantes, en la variación de la superficie glaciar. De esta forma, se segmenta el efecto climático, abarcando la precipitación, la temperatura, los índices PDO y Niño 3.4, y el efecto de la contaminación, focalizado en la variación debida al BC.

La Tabla 4 presenta las alteraciones en la superficie glaciar en km^2 , tanto antes como durante el periodo de la Megasequía. Se observa un acentuado incremento en la disminución del área glaciar para ambos glaciares bajo análisis (GPO y GB) a partir del año 2010. Sin embargo, es esencial resaltar que el impacto de la contaminación en GPO resulta significativo; durante la Megasequía, la reducción del área glaciar debido a la contaminación en GPO llega a -0.185 km^2 , en contraste con -0.011 km^2 en el caso de GB. GPO experimenta una pérdida de

superficie glaciar mayor en comparación con GB, pese a que, en el año 2000, el tamaño de GB era aproximadamente tres veces mayor que el de GPO.

Tabla 4: Variación de superficie glaciar debido a causas climáticas y de contaminación antes y durante el periodo de Megasequía.

	GB*		GPO**	
	2000-2009 [km ²]	2010-2020 [km ²]	2000-2009 [km ²]	2010-2020 [km ²]
Contamination effects	-0.007	-0.011	-0.044	-0.185
Climate effects	-0.110	-0.366	-0.039	-0.284
	-0.117	-0.377	-0.083	-0.469

* 2000 GB area: 4.21 [km²]
 ** 2000 GPO area: 1.33 [km²]

La Figura 4 muestra el porcentaje de reducción de superficie glaciar atribuible a factores climáticos y de contaminación, antes y durante el periodo de Megasequía. Para GPO un 47% del retroceso es por efectos climáticos antes del 2010, mientras que después del 2010 un 61% del retroceso es por efectos climáticos. Por otro lado, para el GB, antes del 2010 un 94% es debido a efectos climáticos, mientras que un 97% es debido a estos efectos después del 2010. Al analizar el efecto del BC, se obtiene que, en GPO, un 53% del retroceso es debido a contaminación antes de 2010, mientras que después del 2010, solo un 39% es debido a BC. Estos resultados subrayan la importancia del clima como factor determinante en la variación de superficie glaciar durante el periodo de la Megasequía. Después del año 2010, el clima se convierte en el factor predominante, incluso en el caso de GPO, cuyo retroceso glaciar es principalmente debido a efecto de contaminación por BC.

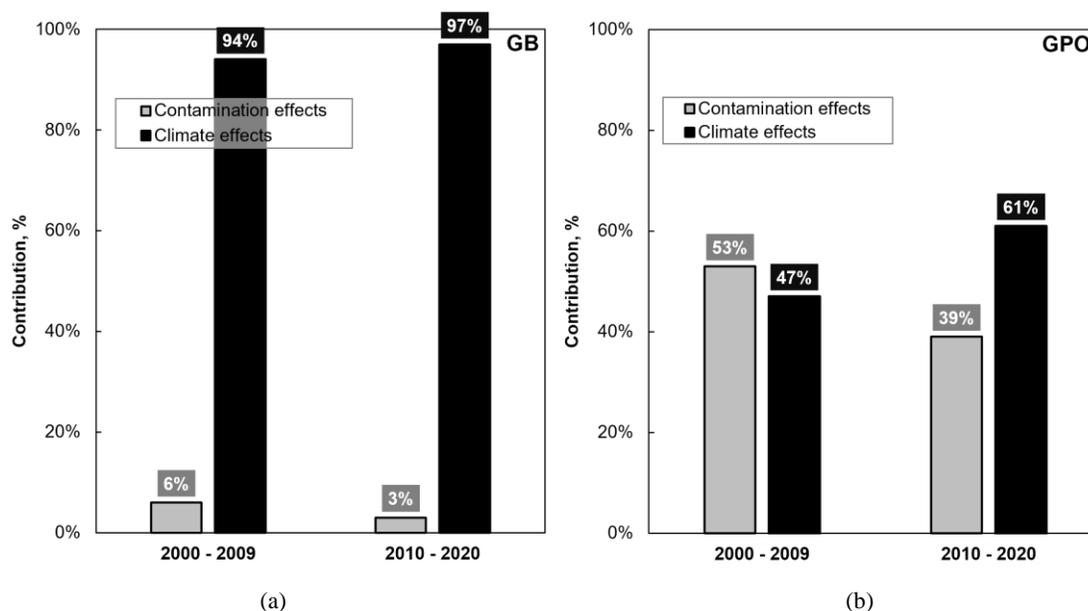


Figura 4: Variación de superficie glaciar en porcentaje antes y después del periodo de Megasequía debido a efectos de contaminación (BC) y climáticos (Cambio climático + Variabilidad Climática).

5. DISCUSIÓN

Se han aplicado modelos de regresión multivariable para estimar la superficie glaciaria a partir de las causas de retroceso climáticas y de contaminación. La selección de regresores significativos, como temperatura, precipitación, PDO, Niño 3.4 y BC, ha sido guiada por la correlación entre las causas de retroceso y las series de área glaciaria. Estos modelos han logrado explicar hasta un 89.9% de las causas de retroceso, confirmando su eficacia y la solidez de sus predicciones.

Los resultados obtenidos revelan un panorama complejo en relación con la pérdida de superficie glaciaria en la región de la Cuenca del Río Maipo y su respuesta a la Megasequía. La variación espacial de los glaciares GPO y GB en las últimas dos décadas evidencia una disminución significativa en sus áreas, con tasas de reducción promedio del 2.1% y 0.6% anual, respectivamente. La aplicación de pruebas estadísticas, como la prueba de Mann-Kendall y la prueba de Pettitt, resalta la consistencia de estas tendencias negativas y su coincidencia con el periodo de Megasequía. Esto también ha sido descubierto por autores como Masiokas et al. (2016), Masiokas et al. (2020) y Garreaud (2019). Sin embargo, la implementación de modelos de regresión multivariable ha permitido revelar los diferentes factores que impulsan esta disminución de recursos hídricos, donde pese a que la Megasequía posee un rol importante desde 2010, en glaciares con alta contaminación de BC (GPO), la contribución de la contaminación es alta durante el periodo de Megasequía (39%) y mucho mayor antes del periodo de Megasequía (53%). Por otro lado, para el GB, antes del 2010 un 94% es debido a efectos climáticos, mientras que un 97% es debido a estos efectos después del 2010.

A pesar de los hallazgos alcanzados mediante la aplicación de modelos de regresión multivariable para comprender las causas de retroceso de los glaciares en la región de la Cuenca del Río Maipo, existe una variable crítica que puede tener un impacto sustancial en las conclusiones: el error de la base de datos para obtener Black Carbon. El BC es un componente crucial en la relación entre la contaminación y el retroceso glaciario, pero su medición y estimación pueden estar sujetas a cierta incertidumbre. Variaciones en la calidad de los datos de BC pueden introducir sesgos en el modelo de regresión, lo que a su vez puede influir en las estimaciones de la contribución de la contaminación a la pérdida de superficie glaciaria. Sin embargo, investigaciones previas han llegado a un consenso en cuanto a que las mediciones directas en terreno de la concentración de BC tienden a ser mayores que las estimaciones proporcionadas por base de datos como CAMS y MERRA2 (Bali et al., 2017; Vignesh et al. 2020). Esta discrepancia implica que el efecto de BC en la pérdida de superficie glaciaria podría ser incluso mayor de lo que hemos identificado en nuestro modelo de regresión. En otras palabras, si pudiéramos contar con mediciones más precisas y representativas de BC, es posible que la contribución de la contaminación a la disminución de los glaciares sea aún más pronunciada de lo que sugieren nuestros resultados actuales.

6. CONCLUSIÓN

Esta investigación ha arrojado luz sobre la compleja interacción entre factores climáticos, contaminación y la pérdida de recursos hídricos en la región de la Cuenca del Río Maipo, específicamente en relación con el retroceso glaciario y la pérdida de recursos hídricos. La aplicación de modelos de regresión multivariable ha permitido revelar los diversos factores que contribuyen a la disminución de la superficie glaciaria en los glaciares GPO y GB durante

las últimas dos décadas. Si bien la Megasequía ha influido en el retroceso glaciar en la Cuenca del Río Maipo, no es el único factor determinante. Es esencial notar que la contaminación, particularmente el Carbono Negro, desempeña un papel significativo en el retroceso de GPO, con una pérdida de recurso hídrico mayor en comparación con GB.

Las mediciones de BC son escasas y difíciles de conseguir, ya que no existen series de tiempo extensas de BC depositado medidas en terreno, y tampoco se dispone de datos históricos a gran escala en Chile. A partir de esto, se reconoce la necesidad de hacer más robusto el modelo de regresión lineal utilizado incorporando un mayor número de años de análisis. Sin embargo, año a año la información disponible va siendo de mayor tamaño, lo que permitiría robustecer el modelo como trabajo futuro. Pese a esto, los hallazgos subrayan la necesidad de considerar no solo los factores climáticos, sino también los impactos locales de la contaminación al abordar los desafíos relacionados con el cambio climático y la gestión de recursos hídricos en esta región. Además, se resalta la necesidad de acciones encaminadas a reducir los efectos de la contaminación en los ecosistemas glaciares, dado que, en la cuenca del Maipo, los glaciares han sido identificados como la principal fuente de aporte hídrico durante los meses de verano.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento de proyecto ANID Anillo ACONCAGUA ACT210021 "*Interactions between environmental compartments and their impact on the Andean eco-hydrosphere under conditions of climate change (ACONCAGUA)*" y Fondecyt Iniciación 11220482 "*Changes in snowmelt as a decisive issue for available water resources in Andean basins in central Chile*".

REFERENCIAS

- Alin, A., 2010. Multicollinearity. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational eStatistics*. 2(3), 370–374.
- Bali, K., Mishra, A. K., & Singh, S. (2017). Impact of anomalous forest fire on aerosol radiative forcing and snow cover over Himalayan region. *Atmospheric environment*, 150, 264-275.
- Burman, P., 1989. A Comparative Study of Ordinary Cross-Validation, v-Fold Cross-Validation and the Repeated Learning-Testing Methods. *Biometrika*. 76(3), 503–514.
- Cereceda-Balic, F; Vidal, V, Moosmüller,H, Lapuerta, M., 2018. Reduction of snow albedo from vehicle emissions at Portillo, Chile". *Cold Regions Science and Technology*. 146, 43-52.
- Cereceda-Balic, F., Ruggeri, M., Vidal, V., 2022. Glacier Retreat Differences in Chilean Central Andes and Their Relation with Anthropogenic Black Carbon Pollution. 434-440.
- Chen, J., Ohmura, A., 1990. Estimation of Alpine Glacier Water Resources and Their Change since the 1870s. *Hydrology in mountainous regions*. 193, 127–35.
- Chen, J., Xiaolin Zhu, J.E., Vogelmann, F. G., Suming J., 2011. A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images. *Remote Sensing of Environment*. 115 (4), 1053-1064.
- Dirección General de Aguas, 2022. Inventario Público de Glaciares (IPG). Ministerio de

- Obras Públicas. <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/InventarioGlaciares.aspx>.
- Dirección General de Aguas, 2022. Reporte de la evolución del clima en Chile. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/index/reporteEvolucionClima>.
- Dozer, J., 1989. Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment*. 28, 9–22.
- Escobar, F., Aceituno, P., 1998. Influencia del fenómeno ENSO sobre la precipitación nival en el sector andino de Chile central durante el invierno. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*. 27(3). ISSN: 0303-7495.
- Farías-Barahona, D., Vivero, S., Casassa, G., Schaefer, M., Burger, F., Seehaus, T., Iribarren-Anacona, P., Escobar, F., Braun, M.H., 2019. Geodetic Mass Balances and Area Changes of Echaurren Norte Glacier (Central Andes, Chile) between 1955 and 2015. *Remote Sensing*. 11(3):260.
- Flemming, J., Benedetti, A., Inness, A., Engelen, R. J., Jones, L., Huijnen, V., Remy, S., Parrington, M., Suttie, M., Bozzo, A., Peuch, V.-H., Akritidis, D., and Katragkou, E., 2017. The CAMS interim Reanalysis of Carbon Monoxide, Ozone and Aerosol for 2003–2015, *Atmos. Chem. Phys.* 17, 1945–1983.
- Garreaud, R., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., Veloso, D., 2019. The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A Climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*. 40.
- Granier, C., Darras, S., Denier van der Gon, H., Doubalova, J., Elguindi, N., Galle, B., Gauss, M., Guevara, M., Jalkanen, J-P, Kuenen, J., Lioussé, C., Quack, B., Simpson, D., Sindelarova, K., 2019. The Copernicus Atmosphere Monitoring Service global and regional emissions (April 2019 version). Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) report.
- Gul, C., Mahapatra, P. S., Kang, S., Singh, P. K., Wu, X., He, C., ... & Puppala, S. P. 2021. Black carbon concentration in the central Himalayas: Impact on glacier melt and potential source contribution. *Environmental Pollution*. 275, 116544.
- Huss, M., Farinotti, D. 2012. Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 117.
- Jenkins, M., Kaspari, S., Shi-Chang, K., Grigholm, B., & Mayewski, P. A. 2016. Tibetan plateau geladaindong black carbon ice core record (1843–1982): recent increases due to higher emissions and lower snow accumulation. *Advances in Climate Change Research*.
- Kang, S., Zhang, Y., Qian, Y., Wang, H., 2020. A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere. *Earth-Science Reviews*. Elsevier B.V.
- Le Quesne, C., Acuña, C., Boninsegna, J.A., Rivera, A., Barichivich, J., 2009. Long-term glacier variations in the Central Andes of Argentina and Chile, inferred from historical records and tree-ring reconstructed precipitation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 281 (3–4), 334–344.
- Masiokas, M., Villalba, R., Luckman, B., Quesne, C., Aravena, J., 2006. Snowpack Variations in the Central Andes of Argentina and Chile, 1951–2005: Large-Scale Atmospheric Influences and Implications for Water Resources in the Region. *Journal of Climate*. 19.

Masiokas, M., 2016. Reconstructing the Annual Mass Balance of the Echaurren Norte Glacier (Central Andes, 33.5° S) Using Local and Regional Hydroclimatic Data. *Cryosphere*. 10(2), 927–40.

Masiokas, M. H., Rabatel, A., Rivera Ibañez, Andrés, Ruiz, L., Pitte, P., Ceballos, J. L., Barcaza, G., Soruco, A., Bown, F., Berthier, E., Dussaillant, I., Mac-Donell, S., 2020. A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere.

Ming, J., Xiao, C., Cachier, H., Qin, D., Qin, X., Li, Z., Pu, J., 2009. Black Carbon (BC) in the snow of glaciers in west China and its potential effects on albedos. *Atmospheric Research*, 92(1), 114–123.

Rignot, E., Rivera, A., Casassa, G., 2003. Contribution of the Patagonia Icefields of South America to sea level rise. *Science*. 302,434–437.

Vignesh, P., Ashish, S., Sandeep, M., Amitesh, G., Sangeeta, S., Vijay, S., Sreekanth, V., Parth S.M., 2020. Black carbon and biomass burning associated with high pollution episodes observed at Valley alley in the foothills of the Himalayas. *Atmospheric Research*. 243, 105001, ISSN 0169-8095.