

ESTIMACIÓN DE BALANCE DE MASA DEL GLACIAR ECHAUREN NORTE EN EL PERÍODO 2020 – 2060

ESTIMATED MASS BALANCE OF THE ECHAUREN NORTE GLACIER IN THE PERIOD 2020 – 2060

Sr. Aníbal León Pérez¹
Sr. Nicolás González Segura²

RESUMEN

Este trabajo estimó el posible comportamiento futuro del balance de masa glaciar en escenarios de emisión RCP 2,6 y RCP 8,5, entre 2020 y 2060, para el glaciar Echaurren Norte (ECHN), ubicado en la cuenca de El Yeso, Región Metropolitana, Chile. Estudios han demostrado que el ECHN ha ido perdiendo masa a través de los años, registrando entre 1975 y 2016 una acumulación de -20 metros equivalentes en agua (m eq. a.). Una hipótesis que se maneja para explicar estos resultados es el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones en la zona central de Chile, acentuándose en la última década con la denominada megasequía. Para lograr las estimaciones se utilizaron datos de proyecciones climáticas de temperatura y precipitaciones en modelos globales (BCC_CSM1-1, CCSM4, GISS-E2-H), tomando como referencia escenarios RCP 2,6 y RCP 8,5. Los resultados arrojaron para los modelos BCC_CSM1-1 y CCSM4, en ambos escenarios RCP, valores de balance de masa negativos, siguiendo la actual tendencia registrada de pérdida de masa glaciar en ECHN. El modelo GISS-E2-H es el único que estima algunos años con balance de masa positivo, donde la principal diferencia con los otros modelos es que éste registra caídas de precipitaciones durante todo el período estudiado. Estos resultados muestran cómo las variables modeladas a futuro pueden afectar los balances de masa glaciar, y en qué condiciones se podrían llegar a obtener balances de masa positivos entre la tendencia general negativa, en este caso con alta dependencia de las precipitaciones proyectadas en los modelos climáticos.

Palabras clave: Balance de masa. Glaciar. Echaurren Norte. Cambio climático. Retroceso de los glaciares.

ABSTRACT

This piece of research estimates the potential future behavior of the glacier mass balance in broadcast scenarios RCP 2,6 and RCP 8,5, between 2020 and 2060, in the Echaurren Norte glacier (ECHN), located in El Yeso basin, Región Metropolitana, Chile. Previous research has shown that ECHN has been losing mass through the years, marking between 1975 and 2016 an accumulation of -20 meters water equivalents (m w. eq.). One hypothesis to explain these results is the increase of temperatures and the decrease of precipitations in the central zone of Chile, emphasizing over the last decade with the so called megadrought. The data used to achieve the estimations came from climatic projections of temperature and precipitations on global models (BCC_CSM1-1, CCSM4, GISS-E2-H), taking as reference the RCP 2,6 and RCP 8,5 scenarios. The results show that the models BCC_CSM1-1 and CCSM4, for both RCP scenarios, have negative values of mass balance, following the currently observed behavior of glacier mass loss on ECHN. The model GISS-E2-H is the only one that estimates some years with positive mass balance values, the main difference compared to the other models is that this model registers precipitations through all the studied period. These results show how the modeled variables on the future could affect the glacier mass balance, and under what conditions it would be possible to obtain positive mass balances within the negative general trend, in this case with high dependence on the projected precipitations of the climate models.

Keywords: Mass balance. Glacier. Echaurren Norte. Climate change. Glacier retreat.

¹ Departamento de Glaciología, Fundación Glaciares Chilenos, Santiago, Chile, aleon@glaciareschilenos.org

² Departamento de Glaciología, Fundación Glaciares Chilenos, Santiago, Chile, ngonzalez@glaciareschilenos.org

Fecha de Recepción: 1 de septiembre de 2019

Fecha de Aprobación: 10 de noviembre de 2019

INTRODUCCIÓN

Los cuerpos glaciares poseen la capacidad inherente de aportar agua a las cuencas cercanas a ellos, producto de los deshielos en épocas estivales o cuando las temperaturas comienzan a aumentar conforme pasan los meses (Bórquez et al., 2006; Larraín, 2007). En la cuenca del Maipo el aporte hídrico de los glaciares en verano puede llegar a alcanzar hasta un 30% por año considerados como secos (Ohlanders et al., 2013; Castillo, 2015), en cambio para años en los que se consideran de sequía extrema este aporte podría alcanzar hasta un 67% (Peña y Nazarala, 1987).

Estudios muestran que los glaciares de la cuenca del Maipo han ido teniendo variaciones negativas principalmente en sus frentes glaciares, en donde cuerpos como el Olivares Alfa ha perdido cerca de 850 metros de su frente entre 1986 - 2011, y los glaciares del Volcán San José han perdido cerca de 864 metros en el mismo período (Rivera et al., 2000; Rivera et al., 2002; Bown, 2008; Méndez et al., 2010; Cassasa, 2000).

Además de las variaciones negativas de los frentes glaciares, existen registros (Torres et al., 2013) de cambios negativos en el balance de masa glaciar. El balance de masa glaciar es definido como la diferencia que existe entre la ganancia de hielo superficial y la pérdida de hielo de un glaciar en un año hidrológico (Cogley et al., 2011; Francou y Pouyaund, 2004). La importancia de obtener balances de masas positivos sostenidos durante los años es que el glaciar podría llegar a avanzar en su frente, caso contrario sucede con balances negativos, en donde el frente tendería al retroceso. (Cogley et al., 2011; Oerlemans, 1989; CECS, 2016).

Una hipótesis que se maneja sobre las variaciones, tanto de los frentes glaciares como de los balances de masa, es la que relaciona los aumentos que han ido experimentando las temperaturas entre 1975 y 2015 de alrededor de 1.1 grados Celsius en la zona central de Chile (Burger et al., 2018), con la disminución en las precipitaciones, las cuales entre los años 2010 y 2015 fueron entre un 25% y 40% menos de precipitaciones (Aceituno et al., 1992; CONAMA, 2006; Quintana y Aceituno, 2006; Falvey y Garreaud, 2009; Garreaud et al., 2015).

Actualmente, y especialmente en la zona central de Chile, se ha registrado durante la última década una de las mayores sequías del país, llegando a alcanzar en el 2015 un acumulado del -20% del agua caída, pudiendo llegar al 50% menos de precipitaciones a lo largo del siglo XXI (CR2, 2015),

en donde se deduce que un cuarto de esta baja en la caída de precipitaciones tendría influencia del cambio climático antrópico, es decir, que las actividades humanas modifican las condiciones meteorológicas (CR2, 2015; Gallardo, 2012; Santibáñez, 2017).

A pesar de contar con una gran cantidad de investigaciones, respecto de las variaciones pasadas y las condiciones actuales de los cuerpos glaciares en los Andes Centrales, que evidencia un claro retroceso de frentes glaciares, aún no se cuenta con información y datos que puedan explicar sobre las posibles variaciones positivas o negativas que podrían experimentar los glaciares, siendo la principal restricción la poca disponibilidad de datos existentes, los que no pueden ser decisores para determinar las condiciones de los Andes Centrales de Chile de aquí a finales de siglo (Pellicciotti et al., 2014).

No obstante, existen investigaciones que han buscado generar información espacial vinculada a estimaciones sobre el balance de masa glaciar en los Andes Centrales, utilizando para ello modelos estimativos del comportamiento futuro tanto de las precipitaciones como de las temperaturas medias a lo largo del siglo XXI, utilizando principalmente datos provenientes de los escenarios RCP (Falvey y Garreaud, 2009; Masiokas, 2009; Masiokas et al., 2016; Rasmusse, 2007; Pellicciotti, 2014; Rivera, 2005; Villalba, 2003).

Un escenario RCP (*Representative Concentration Pathways*, por sus siglas en inglés) corresponde a una proyección en cuanto a las concentraciones de gases de efecto invernadero y el efecto que esto podría traer en las temperaturas y precipitaciones de todo el planeta (IPCC, 2013). Sin embargo, los escenarios RCP no deben ser vistos como una concentración específica a tan largo plazo, sino como representaciones en donde la trayectoria de los cambios debe ser analizada a medida que los años van transcurriendo, teniendo así la posibilidad de actualizar las predicciones (Wayne, 2013).

Los RCP emplean estimaciones de emisiones de gases de efecto de invernadero (GEI) hasta el año 2100. Tales suposiciones están basadas en estimaciones del comportamiento de las actividades económicas, uso de energía, crecimiento de la población y factores socioeconómicos, emisión y concentración de los GEI, además de las condiciones de la salud humana. De esta forma los RCP son esenciales para el establecimiento de metodologías y planes conducentes a la mitigación y adaptación a los cambios climáticos, principalmente a los aumentos

de temperaturas y disminución de precipitaciones (IPCC, 2013; Knutti, 2014; Wayne, 2013).

Para poder comparar los diferentes impactos que tendrían estos escenarios en el planeta se elaboraron cuatro escenarios distintos, los cuales estiman de manera independiente cómo será el contexto global de emisiones de gases de efecto invernadero, más las variables anteriormente descritas. No obstante, la investigación de este trabajo se desarrolló solo con dos de estos escenarios, el RCP 2,6 y el RCP 8,5, los cuales se pasan a detallar a continuación:

- **RCP 2,6:** Desarrollado por el equipo IMAGINE, de la Agencia de Evaluación Ambiental de los Países Bajos. Esta curva engloba los escenarios que llevan a bajas concentraciones de GEI. Se caracteriza por alcanzar un máximo de 3,1 W/m² a mediados de siglo, para luego descender y estabilizarse en 2,6 W/m² a finales de siglo. Además, de que las temperaturas tenderían a subir entre 1,5 – 2 °C para el año 2100 (Van Vuuren et al., 2010; Villalobos, 2016; Wayne, 2013).
- **RCP 8,5:** Desarrollado por el equipo MESSAGE y el Marco Integrado de Evaluación del Instituto Internacional de Análisis Aplicado de Sistemas (IIASA), Austria. Este escenario se caracteriza por el aumento de las emisiones de GEI a lo largo del siglo, en donde las industrias siguen teniendo un avance y la población mundial sigue creciendo, además habría un aumento en las emisiones GEI de alrededor de un 8,6 W/m², sin tener una estabilización visible a lo largo del siglo. Respecto a las temperaturas, éstas debiesen tener un aumento entre un rango de unos 2,6 a 4,8 °C, con un alza promedio a finales de siglo de unos 3,7 °C (Van Vuuren et al., 2010; Villalobos, 2016; Wayne, 2013).

Particularmente en Chile, las estimaciones del modelo RCP 2,6 proyectan un aumento en las temperaturas de alrededor de 2 °C para mediados del presente siglo (Rojas, 2012), en donde la mayor concentración de esos aumentos se daría principalmente en la zona central del país, acentuándose en el valle central y en los Andes centrales (Rojas, 2012). En cuanto a las

precipitaciones, el escenario RCP 8,5 indicará una tendencia a la disminución, particularmente en la zona central las precipitaciones decaerían en orden del 40% para la mitad del siglo XXI (Rojas, 2012).

Sobre la base de lo expuesto con anterioridad, estimar y comparar con distintos modelos climáticos cómo sería el comportamiento del balance de masa glaciar en el Echaurren Norte, es fundamental para empezar a vislumbrar el futuro de otros cuerpos glaciares de la cuenca del Maipo. Más aún, tener nociones y comprender las dinámicas de estos cambios junto a los factores a los que responden, es un conocimiento valioso para poder analizar su posible futuro y las implicancias de aquellos cambios, bajo el matiz de los extremos de los escenarios RCP y de distintos modelos de simulación con diferentes parámetros que permiten vislumbrar posibles condiciones futuras.

ÁREA DE ESTUDIO

El glaciar Echaurren Norte (ECHN, 33,5° S), ubicado a unos 50 kilómetros al este de Santiago, con una extensión de alrededor de 0,4 km², es categorizado como un cuerpo glaciar de montaña, y su frente está aproximadamente en los 3.700 m s. n. m. (Figura 1). El aporte de agua producto de sus deshielos va hacia la subcuenca de El Yeso y la subcuenca de El Volcán, terminando finalmente en la gran cuenca del Maipo (Buglio, 2017; DGA, 2009; DGA, 2014; Joyce, 2008; WGMS, 2013). Además, el ECHN cuenta con un monitoreo constante por parte de la Dirección General de Aguas desde el año 1975, transformándose así en el único glaciar en Sudamérica con una extensión de datos tan antigua (Escobar et al., 1995; DGA, 2014; Joyce, 2008; Buglio, 2017).

A unos 1.280 metros del frente del glaciar, es decir a unos 2.470 m s. n. m., se encuentra la estación meteorológica de El Yeso, que ha podido tener información constante tanto de las precipitaciones y de las temperaturas, siendo el ECHN el glaciar con más datos climatológicos a disposición para realizar estudios de todo el hemisferio sur (Masiokas et al., 2016; Buglio, 2017).

Según Buglio (2017), el glaciar ECHN registra entre 1982 y 2015 una disminución del orden de los 13,6 m eq. a., produciéndose una pérdida del 59,4% en los últimos 6 años. El registro de los balances de masa del ECHN muestran también pérdidas en lo que respecta a este tópico, ya que hasta el 2016 el ECHN tenía un acumulado de -20 m eq. a. (CECS, 2016).

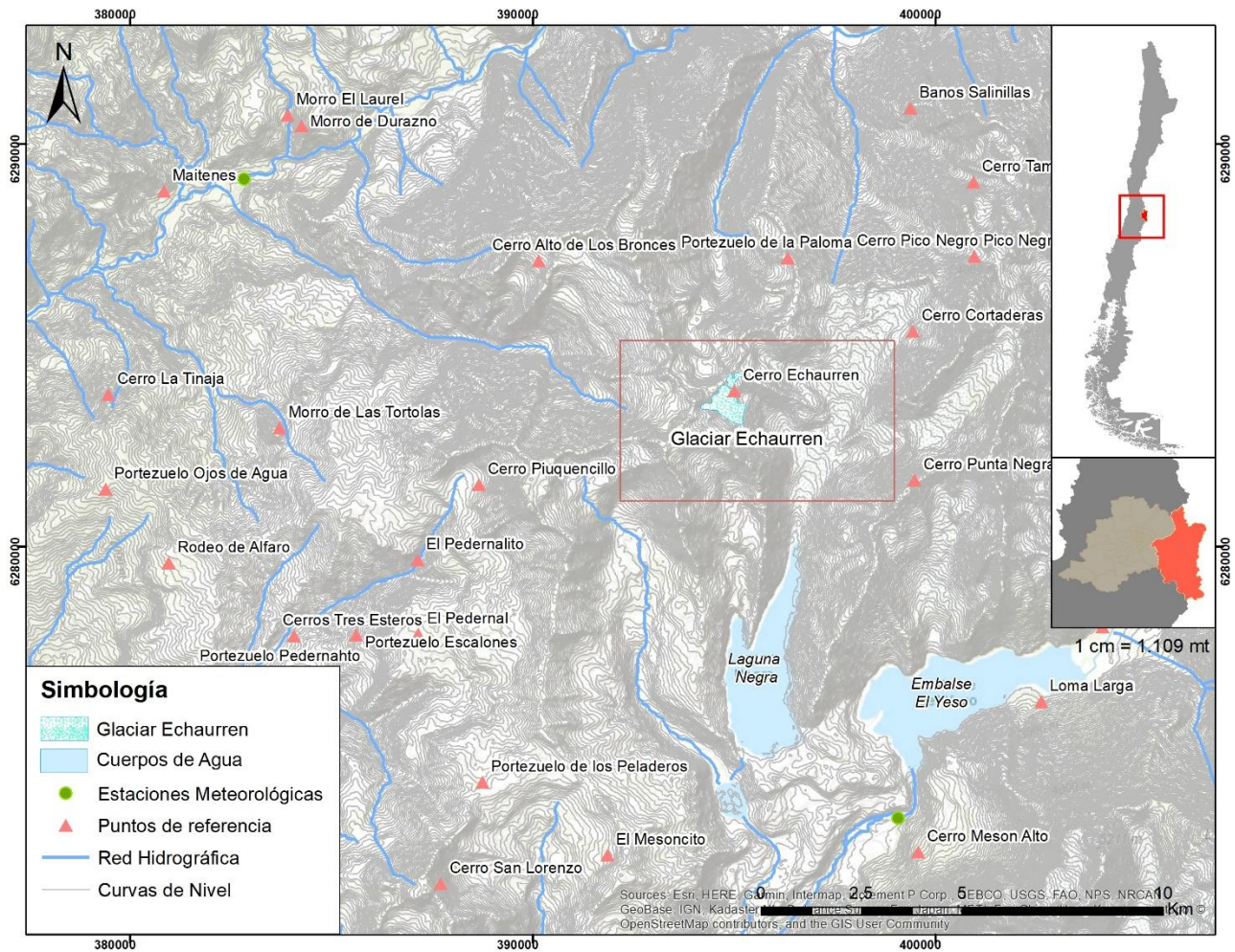


Figura 1. Ubicación del glaciar Echaurren Norte (ECHN), zona central de Chile. Fuente: Elaboración propia.

La variabilidad negativa que tiene el ECHN en cuanto al balance de masa, se explica en parte por los cambios climáticos asociados a eventos El Niño Oscilación del Sur (ENSO) y los cambios en las precipitaciones y temperaturas asociados a las condiciones predominantes en la alta cordillera (Cassasa, 2000). Consecuencia de lo anterior, durante los años en donde existe una predominancia del Niño, es decir, con un aumento en las precipitaciones y una baja en las temperaturas, el balance de masa glaciar en el ECHN tiende a ser positivo, en cambio si las condiciones climáticas que predominan son de la Niña, con una baja en las precipitaciones y un aumento en las temperaturas, los balances de masas en el ECHN registran valores negativos (Cassasa, 2000; Leiva, 2009).

MATERIALES Y MÉTODOS

Las estimaciones de balance de masa para el ECHN se obtuvieron usando el modelo matemático expuesto en Masiokas et al. (2016), donde esencialmente se trabajan con datos estimados o proyectados de precipitaciones y de temperaturas medias, además de incluir dos parámetros escalares constantes, diferenciándose de la ecuación encontrada en Marzeion et al. (2012), en donde no se considera la presencia de una estación meteorológica cercana al frente glaciar, caso contrario sucede en el ECHN, por lo que la ecuación introduce un parámetro escalar que considera las diferencias de altitud entre la estación El Yeso y el frente glaciar.

La ecuación del modelo del cálculo de balance de masa glaciar extraída de Masiokas et al. (2016) es la siguiente:

$$MB = \sum_{i=1}^{12} (\alpha * P_i - \mu * (\max(0, T_i - T_{melt})))$$

En esta ecuación, MB corresponde al balance de masa. El término α corresponde a un parámetro escalar constante introducido para compensar el gradiente de precipitación entre la elevación de la estación meteorológica de El Yeso (considerada como 2.500 m s. n. m.) y el frente del glaciar Echaurren Norte, el cual para efectos de esta investigación se estableció en 3.700 m s. n. m., por lo que siguiendo lo expuesto por Masiokas et al. (2016) bajo estas condiciones corresponde un valor para α de 3,9. La variable μ es un término constante que se expresa en mm K^{-1} , y se introduce para traducir los registros mensuales de temperatura en valores mensuales de ablación en el glaciar, que según la recomendación de Masiokas et al. (2016) se establece un valor para μ de $90,1 \text{ mm K}^{-1}$. El término P_i , corresponde al total de precipitaciones mensuales de la estación El Yeso. T_i representa el promedio de las temperaturas mensuales de la estación, donde se debe realizar una extrapolación respecto de la elevación del frente glaciar y la ubicación de la estación El Yeso, usando para ello un gradiente adiabático seco, que establece una disminución de la temperatura en $0,65 \text{ }^\circ\text{C}$ cada 100 metros. El término T_{melt} corresponde al promedio mensual de temperatura por encima de donde se produce la fusión, para este caso y siguiendo lo expuesto por Marzeion et al. (2012), existe un operador máximo que asegura que la fusión ocurre solo durante los meses en donde se registran temperaturas superiores a T_{melt} , por lo tanto, este valor se establece en $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

La obtención de los datos, de precipitaciones y temperaturas, fue descargada desde el sitio <http://simulaciones.cr2.cl/descargas>, en formato NetCDF. Este tipo de formato trabaja en un gráfico con 3 dimensiones: latitud, longitud y tiempo, entregando información de las variables entre los años 2006 y 2099, en donde se seleccionaron aleatoriamente 3 distintos tipos de modelos climáticos (BCC_CSM1-1, CCSM4, GISS-E2-H), los cuales fueron elaborados por proyectos internacionales y multidisciplinarios, contando cada modelo con distintas estimaciones numéricas de las variables de trabajo.

Los datos de las temperaturas y precipitaciones provienen de estimaciones para todo el globo, así que mediante el uso del programa CDO, se obtuvieron datos grillados para la zona de estudio, es decir, cercana a la estación meteorológica de El Yeso. Para fines investigativos no se consideraron posibles variaciones del frente glaciar, por consiguiente, para el periodo de estudio siempre el frente del glaciar ECHN se estableció en los 3.700 m s. n. m.

RESULTADOS

ESTIMACIONES DE TEMPERATURAS Y PRECIPITACIONES, ESCENARIO RCP 2,6

Bajo el escenario RCP 2,6, los modelos climáticos presentan distintos comportamientos en la variación de sus temperaturas (Figura 2). Las temperaturas tienden a ser similares en promedio, pero se diferencian en los extremos entre los que oscilan, siendo el modelo BCC_CSM1-1 el que presenta un mayor rango de extremos ($4,87 - 26,47 \text{ }^\circ\text{C}$) comparado con los modelos CCSM4 ($7,83 - 24,1 \text{ }^\circ\text{C}$) y GISS-E2-H ($8,63 - 24,94 \text{ }^\circ\text{C}$).

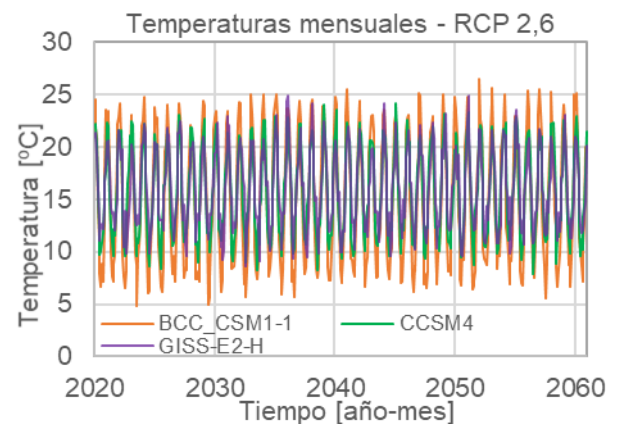


Figura 2. Temperaturas mensuales entre los años 2020-2060 de los modelos climáticos BCC_CSM1-1 (naranja), CCSM4 (verde) y GISS-E2-H (violeta) bajo el escenario RCP 2,6. Se aprecia un mayor rango de extremos de temperaturas para el modelo BCC_CSM1-1. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de las precipitaciones (Figura 3), se observan diferencias tanto en la constancia como en la intensidad de ellas al comparar los tres modelos, siendo el modelo BCC_CSM1-1 el que presenta menores precipitaciones e incluso con meses sin ellas (rango entre $0 - 147,99 \text{ mm}$). El

modelo CCSM4 tiene un comportamiento medio (0,03 – 227,53 mm), y el modelo GISS-E2-H presenta precipitaciones durante todo el período y con mayor intensidad (4,48 – 479,26 mm).

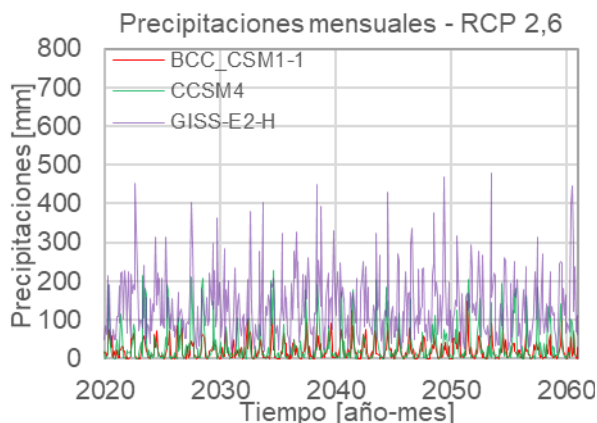


Figura 3. Precipitaciones entre los años 2020-2060 de los modelos climáticos BCC_CSM1-1 (rojo), CCSM4 (verde) y GISS-E2-H (violeta) bajo el escenario RCP 2,6. Se aprecia una mayor constancia e intensidad para el modelo GISS-E2-H. Fuente: Elaboración propia.

ESTIMACIONES DE TEMPERATURAS Y PRECIPITACIONES, ESCENARIO RCP 8,5

Bajo la misma perspectiva, para el caso del escenario RCP 8,5 con las temperaturas (Figura 4), los modelos arrojan comportamientos comparados similares a los del escenario RCP 2,6 (Figura 2). Así, el modelo BCC_CSM1-1 tiene rangos de oscilación mayores (6,15 – 27,38 °C) comparado con los modelos CCSM4 (8,80 – 26,04 °C) y GISS-E2-H (8,44 – 24,20 °C).

Por otra parte, al observar las precipitaciones para el escenario RCP 8,5 (Figura 5), se aprecia un comportamiento comparado similar entre los modelos al visto en el escenario RCP 2,6 (Figura 3). El modelo BCC_CSM1-1 es el que presenta menores precipitaciones, con meses sin ellas (rango entre 0 – 140,70 mm). El modelo CCSM4 tiene un registro medio (0,16 – 445,31 mm) y el modelo GISS-E2-H con precipitaciones durante todo el período y con mayor intensidad (11,93 – 785,34 mm).

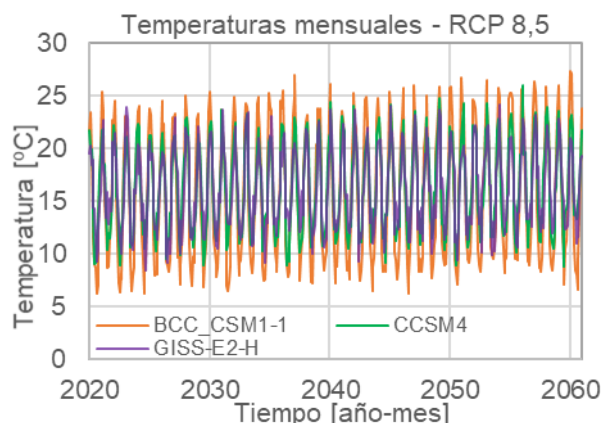


Figura 4. Temperaturas entre los años 2020-2060 de los modelos climáticos BCC_CSM1-1 (naranja), CCSM4 (verde) y GISS-E2-H (violeta) bajo el escenario RCP 8,5. Se aprecia un mayor rango de extremos de temperaturas para el modelo BCC_CSM1-1. Fuente: Elaboración propia.

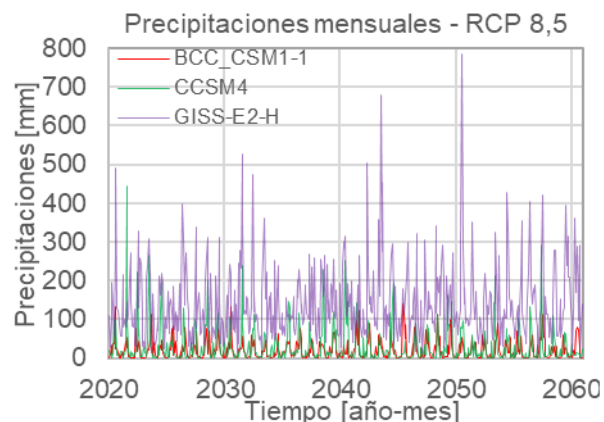


Figura 5. Precipitaciones entre los años 2020-2060 de los modelos climáticos BCC_CSM1-1 (rojo), CCSM4 (verde) y GISS-E2-H (violeta) bajo el escenario RCP 8,5. Se aprecia una mayor constancia e intensidad para el modelo GISS-E2-H. Fuente: Elaboración propia.

ESTIMACIONES DE BALANCE DE MASA GLACIAR, ECHAURREN NORTE, RCP 2,6 Y 8,5

Al calcular los balances de masa glaciar en el período 2020-2060 para el glaciar Echaurren Norte (ECHN) para cada modelo bajo el escenario RCP 2,6 (Figura 6), utilizando los datos de temperaturas (Figura 2) y precipitaciones (Figura 3), se puede observar una presencia general de valores negativos en los tres modelos. El único modelo que

presenta algunos valores positivos es el GISS-E2-H (Figura 6) con altas precipitaciones (Figura 3). Para el caso del escenario RCP 8,5 con los datos de temperaturas (Figura 4) y precipitaciones (Figura 5) se obtuvieron los balances de masa glaciar para los tres modelos (Figura 7) resultando en general valores negativos y solo con algunos valores positivos para el modelo GISS-E2-H, el cual posee mayores precipitaciones en intensidad y constancia (Figura 5) durante el período de estudio. Comparando los distintos modelos y su comportamiento estadístico (Tabla 1), se aprecia que los modelos BCC_CSM1-1 y CCSM4 arrojan promedios de balance de masa bastante más bajos

que el modelo GISS-E2-H. Esto ocurre tanto para el escenario RCP 2,6 como el RCP 8,5, siendo en este último más bajos los promedios dadas las características más extremas del escenario. Al observar comparativamente los máximos y mínimos de los balances de masa para los tres modelos en ambos escenarios (Tabla 1), se vuelve a ver que el modelo GISS-E2-H manifiesta máximos sobre cero a diferencia de los otros dos modelos en que sus máximos son negativos. Este modelo también presenta mínimos más cercanos a cero que los otros dos modelos, en ambos escenarios RCP.

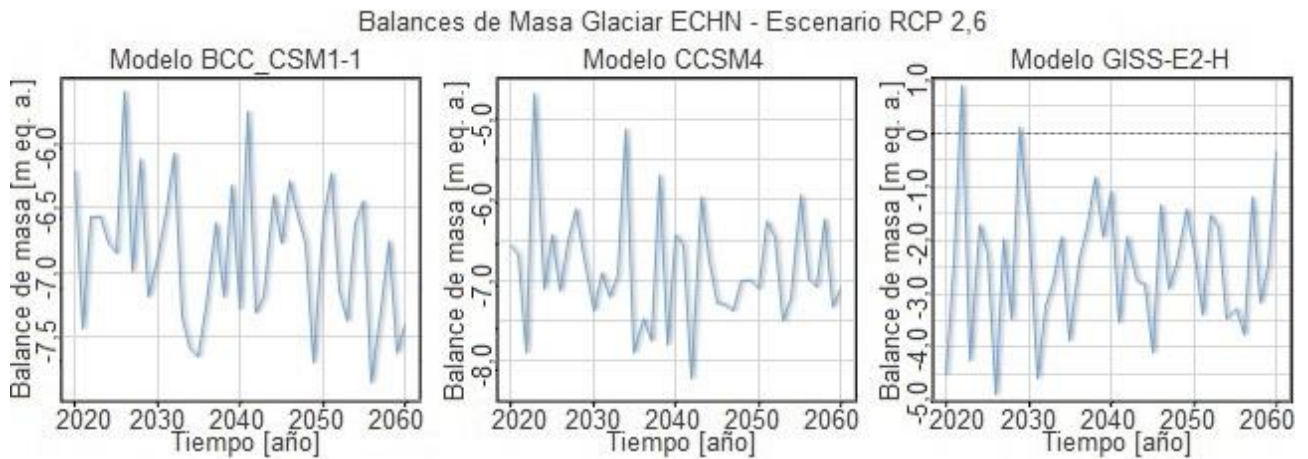


Figura 6. Evolución del balance de masa glaciar bajo el escenario RCP 2,6, para los modelos BCC_CSM1-1 (izquierda), CCSM4 (centro) y GISS-E2-H (derecha), siendo este último el único que presenta algunos valores positivos. Fuente: Elaboración propia.

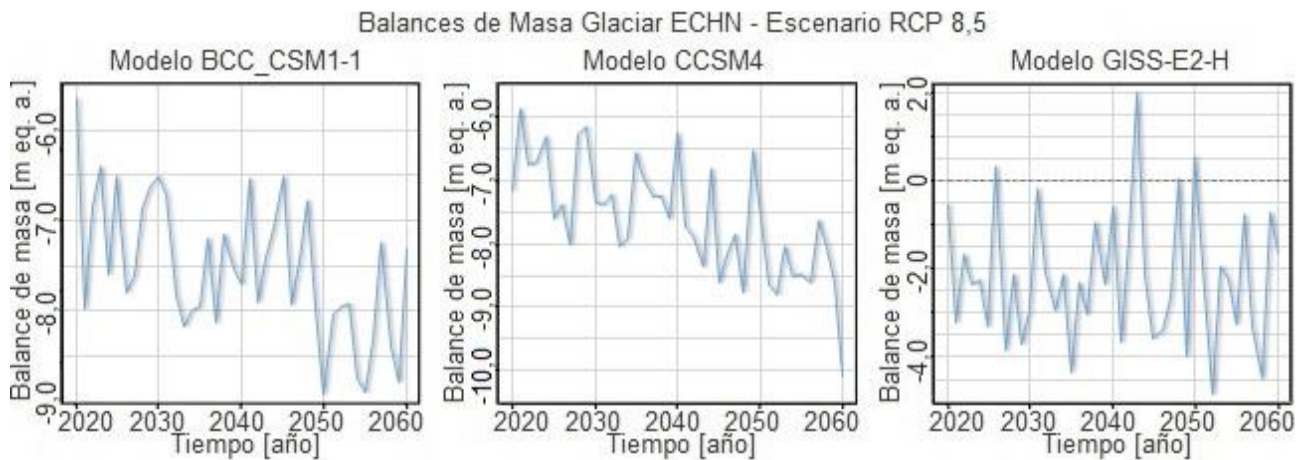


Figura 7. Evolución del balance de masa glaciar bajo el escenario RCP 8,5, para los modelos BCC_CSM1-1 (izquierda), CCSM4 (centro) y GISS-E2-H (derecha), siendo este último el único que presenta algunos valores positivos. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1: Valores estadísticos de los resultados de balance de masa glaciar del ECHN, bajo ambos escenarios RCP y para los tres modelos de estudio. Se muestra el promedio con su desviación estándar (DE), los máximos y mínimos arrojados junto al año de ocurrencia respectivo.

Modelos climáticos	RCP 2,6 – Balances de masa [m eq. a.]				RCP 8,5 – Balances de masa [m eq. a.]			
	Promedio	DE	Máx. (año)	Mín. (año)	Promedio	DE	Máx. (año)	Mín. (año)
BCC_CSM1-1	-6,8584	0,5503	-5,5910 (2026)	-7,8533 (2056)	-7,5333	0,7619	-5,6652 (2020)	-8,9293 (2050)
CCSM4	-6,8557	0,7279	-4,6620 (2023)	-8,2283 (2042)	-7,6005	0,8994	-5,8773 (2021)	-10,0837 (2060)
GISS-E2-H	-2,4464	1,2790	0,9056 (2022)	-4,8868 (2026)	-2,1854	1,4973	1,9913 (2043)	-4,8557 (2052)

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos para los modelos BCC_CSM1-1 y CCSM4 evidencian que el glaciar Echaurren Norte tendería a seguir con el comportamiento actual de pérdida de masa glaciar, continuando con valores de balance de masa negativos como en los últimos 40 años, con un valor de -5 m eq. a. observado en el 2016 (CECS, 2016; Buglio, 2017; DGA, 2010; Masiokas et al., 2016). Una posible explicación sobre la simulación negativa del balance de masa tiene relación con la clara disminución de las precipitaciones durante el período de estudio, mostrando en ambos modelos, y especialmente en el escenario RCP 8,5, meses en los que se registrarían cerca de 0 mm de agua caída.

No obstante, que el modelo GISS-E2-H estimara valores positivos de balances de masa para ambos escenarios RCP, se explica porque las simulaciones que hacen referencia a la caída de precipitaciones no disminuirían a lo largo del siglo, sino que hay presencia de ellas en todos los meses del periodo y no solo en los invernales, abarcando los meses de septiembre, octubre, noviembre e incluso los estivales.

Comparativamente, los resultados de los modelos GISS-E2-H, CCSM4, frente a otras investigaciones relacionadas a la estimación de balance de masa glaciar en cuerpos glaciares de otras latitudes, siguen la misma línea de predicciones negativas, ya que en el estudio de Chatuverdi (2014), cuerpos glaciares ubicados en los Himalayas bajo un escenario RCP 8,5 de aquí a finales de siglo registrarían pérdidas acumuladas de -35 Gt/a

(gigatoneladas por año), en cambio para un escenario RCP 2,6 esta cifra alcanzaría un valor de -12 Gt/a.

Frente a estos resultados no hay que dejar de lado el efecto humano dentro de los territorios, pues si la emisión de gases de efecto invernadero sigue su ritmo actual, la principal consecuencia es que las temperaturas sí vayan en aumento, afectando principalmente a la capa de la criósfera (Gallardo, 2016). De esta forma los cuerpos glaciares no tendrían la capacidad de compensar los cambios ambientales que se registrarían en épocas venideras, generalizándose así la tendencia a tener balances de masa glaciar negativos y la incorporación de mayores montos de agua al ciclo hidrológico, principalmente en la escorrentía desde las cuencas alto andinas a las regiones litorales, y por lo tanto un consecuente incremento en el nivel medio del mar a escalas locales y globales (Marzeion et al., 2012).

Llevando lo anteriormente expuesto al Echaurren Norte, considerando la sostenida pérdida de masa glaciar sumado a las estimaciones que prevén la continuidad del fenómeno, es que se podría inferir que el glaciar en los años venideros pueda aportar una mayor cantidad de agua a la subcuenca de El Yeso, sin embargo, ese aporte se podría ver interrumpido en el momento en que el Echaurren ya no tenga suficiente hielo superficial para cumplir tal aporte. Es decir, en cierta época el cuerpo glaciar podría desaparecer del territorio.

Esta metodología de trabajo podría desarrollarse en otros cuerpos glaciares de la cuenca del Maipo, que cuenten con una mayor espacialidad dentro del territorio y que su aporte hídrico por medio del

deshielo sea mayor al del Echaurren Norte, permitiendo así establecer medidas de mitigación y adaptación frente a las variaciones negativas que podrían experimentar glaciares ubicados a mayor altitud. Además, sería de gran apoyo poder incorporar datos a la ecuación de trabajo, básicamente posibles cambios de altitud de los frentes glaciares, para determinar cambios de temperaturas en altitud mediante el uso del gradiente adiabático seco.

Obtener un balance de masa positivo por los datos contenidos en un modelo no se consideraría como un resultado erróneo, basado en las proyecciones climáticas en los Andes Centrales, sino que podría ser visto como una oportunidad para visualizar y conocer cuáles serían las condiciones óptimas de precipitaciones y temperaturas para que existan balances de masa positivos, y así no ir comprometiendo los aportes hídricos de los glaciares a la Cuenca del Maipo.

Una de las tareas pendientes del trabajo con datos de NetCDF, es poder convertir los datos de balance de masa desde metros equivalentes en agua a metros cúbicos, para así poder estimar variaciones en el aporte hídrico a las cuencas aledañas a la gran cuenca del Maipo, no solo para el glaciar Echaurren Norte sino también para otros cuerpos, obteniendo una idea general y particular de cómo podría verse afectado el caudal del Río Maipo a medida que hay retroceso glaciar.

Los resultados obtenidos de las estimaciones del balance de masa glaciar del ECHN muestran el mismo comportamiento negativo de las últimas dos décadas. Sin embargo, a futuro aún quedan estudios por realizar, respecto a ir disminuyendo las incertidumbres asociadas al uso de datos provenientes de escenarios RCP. Por incertidumbre se hace referencia a considerar que las variables de precipitaciones y temperaturas poseen un carácter no determinado en el tiempo, por lo que la mejor vía de trabajo para este tipo de metodología es entenderlas y desarrollarlas probabilísticamente, es decir, podrían o no suceder según el modelo escogido. Una propuesta interesante para esto es la entregada por el CR2, que apunta a una reducción de las incertidumbres a medida que se van cubriendo todas las posibilidades de que cierto evento se cumpla o no, pudiendo así tener datos ensamblados desde distintas fuentes.

A pesar de que los resultados de balance de masa glaciar obtenidos en el glaciar Echaurren Norte puedan ir en la misma línea que otras investigaciones similares, y se entronquen a las

proyecciones climáticas para Chile Central, no hay que considerar como absolutos los datos generados, ya que al tratarse solo de estimaciones de temperaturas y precipitaciones éstas podrían irse o no cumpliendo, acorde vayan pasando los años.

REFERENCIAS

- Aceituno, P., Fuenzalida, H., & Rosenbluth. (1992). Climate along the extratropical Westcoast of South America. *Earth Systems responses to global change*, 61 - 69.
- Bórquez, R., Larraín, S., Polanco, R., & Urquidi, J. (2006). *Glaciares Chilenos: Reservas Estratégicas de agua dulce para la sociedad, los ecosistemas y la economía*. Santiago: LOM.
- Bown, F., Rivera, A., & Acuña, C. (2008). Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, 44, 43 -48.
- Buglio, F. (2017). *Reanálisis de las series de mediciones del balance de masa del glaciar Echaurren Norte, Región Metropolitana, Chile*. Santiago: Tesis. Universidad de Chile.
- Burger, F., Brock, B., & Montecinos, A. (2018). Seasonal and elevational contrasts in temperature trends in Central Chile between 1979 and 2015. *Global and Planetary Change*, 136-147.
- Caro, D. (2017). *Modelación de la respuestas hidrológicas en las cuencas glaciares Tapado (29°S) y Pirámide (33° S) en los Andes semi - áridos de Chile*. Santiago: Universidad de Chile.
- Carrasco, J. C. (2017). *Evidencias del cambio climático en Chile sus consecuencias y proyecciones. Trabajo Final de Master*. Business School.
- Cassasa, G., Rivera, A., & Schwikowski, M. (2006). Glacier mass-balance data for southern South America (30°S–56°S). 239.
- Castillo, Y. (2015). *Caracterización de la hidrología glaciar en la cuenca del maipo*. Santiago: Tesis: Universidad de Chile.

- Centro de Estudios Científicos . (2011). *Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas.
- Chaturvedi , R., & Kulkarni, A. (2014). Glacial mass balance changes in the Karakoram and Himalaya based on CMIP5 multi-model climate projections. *Climatic Change*.
- Cogley, J. (1999). Effective sample size for glacier mass balance, *Geografiska Annaler. Journal of Geology*, 79-86.
- CONAMA. (2006). *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI:Informe Final*. Santiago: Universidad de Chile.
- DGA. (2009). *Estrategia Nacional de Glaciares*. Santiago: Centro de Estudios Científicos.
- DGA. (2010). *Balance de masa en el glaciar Echaurren Norte temporadas 1997 - 1998 a 2008 - 2009*. Santiago: DGA.
- Falvey, M., & Garreud, R. (2009). Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979-2006). *Journal of Geophysical Research*, 114, 1 -16.
- Francou, B., & Pouyaund, B. (2004). *Métodos de observación de glaciares en Iso Andes Tropicales: Mediciones de terreno y procesamiento de datos*. París: Publicaciones GREAT ICE IRD.
- Huss, M. (2012). Extrapolating glacier mass balance to the mountain-range scale: the European Alps 1900–2100. *The Cryosphere*, 713-727.
- IPCC. (2013). *Cambio Climático 2013. Bases Físicas*. Instituto para el cambio climático.
- Joyce, S. (2009). Nieves y Glaciares: Recursos Hídricos en la Cuenca del Maipo . *Middlebury College*.
- Larraín, S. (2007). Glaciares Chilenos: Reservas estratégicas de agua dulce . *Revista Ambiente y Desarrollo de CIPMA* , 28 - 35.
- Le Quesne, C., Acuña, C., Boninsegna, J., Rivera, A., & Baricovich, 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*, 334-344.
- Marzeion, B., Hofer, B., Jarosch, A., Kaser, G., & Molg, T. (2012). A minimal model for reconstructing interannual mass balance variability of glaciers in the European Alps. *The Cryosphere*, 71-84.
- Marzeion, B., Jarosch, A., & Hofer, M. (2012). Past and future sea-level change from the surface mass balance of glaciers. *The cryosphere*, 1295-1322.
- Masiokas , M., Rivera, A., Espizua, L., Villalba, R., Delgado, S., & Aravena, J. (2009). Glacier fluctuations in extratropical South America during the past 1000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 242-268.
- Masiokas, M., Christie, A., Le Quesne, C., Pitte, P., Ruiz, L., Villalba, R., . . . Barcaza, G. (2016). Reconstructing the annual mass balance of the Echaurren Norte glacier (Central Andes, 33.5° S) using local and regional hydroclimatic data. *The Cryosphere*, 927-940.
- Oerlemans, J., & Hoogendoorn, N. (1989). Mass Balance - Grandientes and climate change. *Journal of claciology*, 399-405.
- Ohlanders, N., Rodríguez, M., & McPhee, J. (2013). Stable water isotope variation in a Central Andean watershed dominated by glacier and snowmelt. *Hydrology Earth System Sciences*, 17, 1035 -1050.
- Pellicciotti, F., Rageteli, S., Carenzo, M., & McPhee, J. (2014). Changes of glaciers in the Andes of Chile and priorities for future work. *Sciencie of the total environment*, 1197-1210.
- Rasmussen, L., Conway, H., & Raymond, C. (2007). Influence of upper air conditions on the Patagonia. *Global Planet*, 203-216.
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, F., Muñoz, C., & Vuille, M. (2016). *Balance de Masa*. Valdivia: Ediciones Cecs.
- Rojas, M. (2012). *Proyecciones climáticas futuras y análisis de incertidumbre. En La Economía del cambio climático en Chile*. Colección Documentos de proyectos, CEPAL.

- Segovia, A., & Videla, Y. (2017). Caracterización glaciológica de Chile. *Investigación Geográfica Chile*, 3-24.
- Torres, H., Brenning, A., & García, J. (2013). Balance de masa del glaciar cubierto del Pirámide (Chile Central, 33°S) entre 1965 y 2000 aplicando métodos geodésicos. *Geografía y Espacios*, 11-25.
- Van Vuuren, D. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change. Issue*, 5-31.
- Villalobos, D. (2016). *Análisis actual y proyecciones de la temperatura y precipitación del Norte Grande y su Altiplano en Chile. Variabilidad (1970-2013) y Cambio Climático en el escenario*. Santiago.
- Wayne, G. (2013). *The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways*. www.skepticalscience.com.