



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

**ESCENARIOS FUTUROS DE UNA MUESTRA DE LOS GLACIARES MÁS
REPRESENTATIVOS DE LA ZONA CENTRAL DE CHILE, A PARTIR DE SUS
VARIACIONES CLIMÁTICAS**

Memoria para optar al título profesional de Geógrafa

NICOL CAROLINA BARRIGA ÁVILA

Profesor Guía: Pablo Sarricolea

SANTIAGO – CHILE

2019

AGRADECIMIENTOS

Quisiera partir agradeciendo el apoyo de mi familia: de mi madre, quien nunca dejó de confiar en mis tiempos y me acompañó en este largo proceso de maduración profesional, a mi padre y mi hermana, quienes me han ayudado a tomar mejores decisiones y hacerme responsable en el camino de la vida. Los amo de manera infinita y agradezco cada momento de aprendizaje.

A mi pareja, mi pollito Emilio, quien ha sido pilar fundamental para terminar este proceso y quien nunca dejó de darme fuerzas y creer en mí cuando más lo necesitaba y con mucho amor logró hacerme ver las soluciones, enfocarme en ellas como mis objetivos a seguir, alegrando mis días y logrando aflorar el entusiasmo ante cualquier batalla.

A Claudia Galleguillos, quien fue mi guía en la práctica realizada en Fundación Chile, abriéndome las puertas a descubrir lo mucho que me gusta el mundo hídrico y lo que anhelo desempeñarme en dicha área. Además de darme el apoyo profesional, me dio apoyo humano en el trabajo y me enseñó que cuando uno quiere hacer algo nuevo tiene que luchar con personas que inevitablemente no creerán en la posibilidad de desarrollarlo, pero solo la constancia y el trabajo demostrarán que todo lo que nos proponemos es posible.

A mi profesor guía, Pablo Sarricolea, quien de manera muy responsable me ha encaminado estos meses a desarrollar el presente proyecto, mostrándome algunos métodos de trabajo prospectivos que desconocía como desarrollar, y con amabilidad y paciencia me ha enseñado cómo realizarlos.

A mis amigos, hermanos que he escogido en mi vida, y que son una luz en mi andar, Fran, Gaby, Pauli, Camilo, Emilio, Jimmy, Curi, Kevin, Shaggy, Basti, Alfito, Camila y Kamila, Fele, Carlos, Flo, Yani, Pajarito y Mañu.

Finalmente, a mis amigas de la Universidad, Pía, Ruth, Trini, Eve, Berni y Arlyn, quienes me llevaron a incursionar en el camino de la geografía y han sido un pilar fundamental en el desarrollo de la carrera. A Eduardito, Luis, Cristóbal, Frances, Beatriz, Blopita, Maxi, Mariam, Fernando y geocompañeros.

Gracias.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	7
CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN	8
1.1 Planteamiento del problema	8
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo General	11
1.2.2 Objetivos Específicos	11
CAPÍTULO 2: AREA DE ESTUDIO	12
2.1 Zona central de Chile	12
2.1.1 Geomorfología.....	13
2.1.2 Geología.....	14
2.1.3 Clima	14
2.1.4 Hidrografía.....	14
2.1.5 Flora y fauna	15
2.1.6 uso de suelo y actividades antrópicas.....	15
2.2 Cuencas	16
2.2.1 Cuenca del río Aconcagua.....	18
2.2.2 Cuenca del Río Maipo.....	19
2.2.3 Cuenca del Río Rapel	20
2.2.4 Cuenca del Río Mataquito.....	22
CAPITULO 3: MARCO TEORICO	24
3.1 Glaciares	24
3.1.1 Definición de glaciar	24
3.1.2 Balance de masa anual	26
3.1.3 Tipos de glaciares en el Área de estudio	28
3.1.3.1 Según morfología.....	28
3.1.3.1.1 Glaciar de valle.....	28
3.1.3.1.2 Glaciar de montaña.....	29
3.2.3.2 Según temperatura	29
3.1.3.2.1 Glaciares fríos.....	29

3.1.3.2.2 Glaciares temperados.....	29
3.2 Cambio Climático y Variabilidad Climática.....	29
3.2.1 Antecedentes del Cambio climático en Chile Central.....	31
3.2.2 Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO).....	33
3.2.4 Temperaturas.....	35
3.2.5 Precipitaciones.....	35
3.3 Otros factores y limitaciones.....	35
3.3.1 Topografía.....	35
3.3.2 Altitud y Latitud.....	36
3.3.3 Cualidades internas del glaciar.....	37
3.4 Escenarios de Cambio Climático en Chile Central, para el Siglo XXI.....	37
3.4.1 Trayectorias de concentración representativas (RCP).....	39
3.4.2 Modelo Climático Global WorldClim 1.4, versión Hadley Global Environment Model 2 – Earth System (HadGEM2ES).....	41
CAPITULO 4: METODOLOGÍA.....	43
4.1 Sistematización y descripción de las características de los glaciares en estudio y sus variaciones areales.....	43
4.1.1 Obtención de datos de imágenes raster.....	44
4.2 Estimación de las trayectorias de cambio climático y sus efectos en los glaciares..	47
4.2.1 Downscaling o Reducción de escala de imágenes satelitales.....	47
4.2.2 Representación de variables BIO1 y BIO12.....	48
4.3 Análisis de relación entre las proyecciones de cambios climáticos y las características de los glaciares en estudio.....	48
4.3.1 Coeficiente de correlación de Pearson.....	49
CAPITULO 5: RESULTADOS.....	51
5.1 Resultado 1: Sistematización y descripción de las características de los glaciares en estudio.....	51
5.2 Resultado 2: Trayectorias de cambios climáticos y sus efectos en los glaciares.....	56
5.2.1 Temperatura media anual – BIO1.....	56
5.2.2 Precipitación anual – BIO12.....	67
5.3 Resultado 3: Análisis correlacional entre las proyecciones de cambios climáticos y las características de los glaciares en estudio.....	76
CAPITULO 6: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	78

6.1 Discusiones	78
6.2 Conclusiones	80
BIBLIOGRAFÍA.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Área de estudio.....	12
Figura 2: Cuenca de Río Aconcagua.....	18
Figura 3: Cuenca de Río Maipo.....	20
Figura 4: Cuenca del Río Rapel.....	21
Figura 5: Cuenca del Río Mataquito.....	23
Figura 6: Perfil vertical por el eje de un glaciar, mostrando la disposición de las zonas de acumulación y ablación.....	27
Figura 7: Esquema en planta de campo teórico de esfuerzos en un glaciar y la disposición de los sistemas de fracturas en la masa de hielo.....	28
Figura 8: Precipitación histórica en Santiago.....	32
Figura 9: Progresivo aumento del déficit hídrico en Santiago.....	32
Figura 10: Ciclos de El Niño-La Niña en Valparaíso, desde 1950.....	33
Figura 11: Perfil Altitudinal de la Cordillera de los Andes a lo largo de Chile.....	36
Figura 12: Alza esperada en el límite inferior de las nieves.....	38
Figura 13: Intercambio de energía radiativa promedio en la tierra.....	39
Figura 14: Representación esquemática de la estructura de cuadrícula cartesiana utilizada en GCM de diferencias finitas.....	41
Figura 15: Recorte de variable BIO1 a glaciar Cipreses.....	44
Figura 16: Detalle de reducción de escala.....	47
Figura 17: Preferencia de orientación de glaciares en estudio.....	52
Figura 18: Máxima altura (msnm) de los glaciares en estudio.....	57
Figura 19: Correlación entre la temperatura promedio y la máxima altura (msnm) de los glaciares en estudio.....	58
Figura 20: BIO1 – T ^o media anual de glaciares, según línea base y escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5.....	59
Figura 21: Variación de temperatura media de cada glaciar en estudio, según escenario actual (LB) y futuros (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (a).....	60
Figura 22: Variación de temperatura media de cada glaciar en estudio, según escenario actual (LB) y futuros (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (b).....	61
Figura 23: Variación de temperatura media de cada glaciar en estudio, según escenario actual (LB) y futuros (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (c).....	62
Figura 24: Variación de temperatura media de cada glaciar en estudio, según escenario actual (LB) y futuros (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (d).....	63
Figura 25: Variación de temperatura media de cada glaciar en estudio, según escenario actual (LB) y futuros (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (e).....	64

Figura 26: Variación de temperatura media de cada glaciar en estudio, según escenario actual (LB) y futuros (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (f)	65
Figura 27: bio12 – Baja (%) de la PP media anual de glaciares, respecto de su línea base	68
Figura 28: Variación de precipitación anual de cada glaciar en estudio, según escenario actual (LB) y futuros (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (a)	69
Figura 29: Variación de precipitación anual de cada glaciar en estudio, según escenario actual (LB) y futuros (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (b)	70
Figura 30: Variación de precipitación anual de cada glaciar en estudio, según escenario actual (LB) y futuros (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (c).....	71
Figura 31: Variación de precipitación anual de cada glaciar en estudio, según escenario actual (LB) y futuros (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (d)	72
Figura 32: Variación de precipitación anual de cada glaciar en estudio, según escenario actual (LB) y futuros (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (e)	73
Figura 33: Variación de precipitación anual de cada glaciar en estudio, según escenario actual (LB) y futuros (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (f)	74
Figura 34: Valores de correlación de Pearson para las variables analizadas.....	77

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Glaciares a estudiar en la zona Central de Chile	13
Tabla 2: Subcuencas de la zona central, con glaciares inventariados	17
Tabla 3: Episodios históricos del fenómeno de la niña.....	34
Tabla 4: Trayectorias de Concentración Representativas (RCP).....	40
Tabla 5: Resolución del modelo HadGEM2-ES.....	42
Tabla 6: Variables utilizadas según fuente de extracción de datos.....	44
Tabla 7: Cálculos para obtener los valores promedio de las variables precipitación y temperatura	45
Tabla 8: Procesamiento de valor promedio de precipitación según línea base (en escala 1:1) – Glaciar Monos de Agua.....	46
Tabla 9: Esquema metodológico aplicado para ver proyecciones futuras de las variables climáticas que pueden afectar a los glaciares en estudio, a mediados del siglo XXI.....	50
Tabla 12: Temperatura media anual de los glaciares, según línea base	54
Tabla 13: Precipitación anual de los glaciares, según línea base.....	55
Tabla 14: Datos de temperatura media anual, en el escenario actual, futuro medio optimista y futuro medio pesimista	56
Tabla 15: Datos de precipitación anual, en el escenario actual, futuro medio optimista y futuro medio pesimista.....	67

RESUMEN

Según se indica en la Estrategia Nacional de Glaciares (2007), el agua, en todas sus formas y estados, resulta ser uno de los componentes del sistema natural que presenta síntomas de fragilidad debido a los cambios climáticos observados.

En Chile, el retroceso glaciar generalizado está poniendo en riesgo la cantidad de agua dulce dispuesta para la población, especialmente en periodos de sequía, cuestión que viene afectando desde el 2010 a la fecha.

El presente estudio tiene por objetivo evaluar a futuro la relación existente entre diversas variables geomorfológicas (altura, orientación, pendiente, espesor, área y variación areal) y climáticas (precipitación y temperatura) que pueden afectar el derretimiento glaciar en la zona central.

Para esto se proyecta un escenario optimista y otro pesimista de vías de concentración representativas (RCP 2.6 y RCP 8.5) al año 2050, de las precipitaciones y temperaturas de 15 glaciares de la zona central, mediante la extracción y recopilación de datos climáticos actuales del Modelo Climático Global *WorldClim 1.4* (específicamente los datos de la versión HadGEM2-ES), a partir de datos observados entre los años 1960 – 1990, que conforman la línea base.

Los datos se obtienen de imágenes satelitales con resolución de 1 x 1 kilómetro, procesadas mediante *downscaling*, alcanzando un nivel de detalle de 50 x 50 metros

Por otra parte las variables geomorfológicas son variables independientes y son correlacionadas con el método *Pearson*, con el objetivo de determinar si existe o no una relación lineal entre las proyecciones climáticas y las características de los glaciares en estudio.

Los resultados indican que de los glaciares en estudio, los que se sitúan en la parte sur estarían mayormente expuestos a cambios más significativos de temperatura y precipitación. Se observa también la altitud como factor determinante sobre la temperatura y la precipitación, afectando la línea de nieves que se desplaza a medida que aumenta la temperatura y provoca mayor precipitación en zonas donde anteriormente caía nieve. Así se constató semejanzas entre los registros ya estudiados y las proyecciones de escenarios futuros realizadas en el presente documento.

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua dulce, constituye un elemento fundamental para todos los seres vivos existentes en la tierra y resulta indispensable para el desarrollo de las actividades que realiza el hombre. Sin embargo, en la actualidad y de manera progresiva, se advierte que prontamente este será un recurso natural escaso y nuevos territorios de nuestro país lidiarán con la brecha entre lo que necesitan y lo que efectivamente disponen (DGA, 2016), por lo que la competencia por el acceso a este bien será de grandes proporciones.

Según el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)² de la Universidad de Chile (2015), el país sufre la sequía de mayor extensión territorial y temporal registrada durante el último siglo en la zona central y sur de Chile. Aproximadamente, más de siete años de bajas en las precipitaciones han afectado al país, sobre todo a las regiones de Coquimbo, Valparaíso, O'Higgins y Metropolitana, las que concentran 70 % de las 101 comunas del país que presentan en forma simultánea síntomas graves de sequía.

En este contexto los glaciares juegan un rol crucial ya que del 2,5 % de agua dulce existente en el planeta, el 75 % se encuentra presente en glaciares y casquetes polares por lo que son considerados como grandes reservas estratégicas de agua en estado sólido (DGA, 2016).

“A nivel mundial Chile representa el 3,8 % de la superficie glaciaria excluyendo Antártica y Groenlandia” (CECS, 2009); en tanto a nivel sudamericano posee una cobertura del 76 % de la superficie glaciaria, estimada en 28.286 km² (MMA, 2011), distribuidos en 24.114 glaciares aproximadamente los que se extienden desde el borde sur de Perú en los 17°30' S al extremo sur de Sudamérica en los 55° S., los que pueden aportar al caudal de escorrentía en el estiaje de periodos secos (DGA, 2016).

Por otro lado, también son considerados buenos indicadores de cambios climáticos, debido a que la mayoría de ellos han experimentado cambios históricos en clara relación con las variaciones de clima (CECS, 2009).

Esto tiene especial relevancia en Chile central, pues se concentra la mayor parte de la población del país, y donde una fuente importante de agua proviene del derretimiento nival (y glaciario, particularmente en la seca temporada estival), y tiene más relevancia en la primavera y el principio del verano, mientras que el derretimiento glaciario alcanza su máximo en la mitad del verano y es especialmente relevante hacia fines del verano (Casassa, y otros, 2015). Esto ya lo advertía Peña y Nazarala en el año 1987 al simular los caudales de derretimiento del Río Maipo en El Manzano (850 msnm) obteniendo que los aportes de fusión y escorrentía glaciaria representaban para un año “normal” un 34 % del caudal de febrero, y hasta un 67 % del caudal del verano más seco registrado

históricamente (1968/69), por lo que en Chile central, los glaciares resultan fundamentales para la mantención de los caudales de estiaje, siendo su contribución más significativa durante los periodos de sequía (Peña & Nazarala, 1987).

No obstante lo anterior, con el aumento de la temperatura de la superficie terrestre global promediado en 0,85 grados centígrados (°C), observada desde mediados del siglo XIX (IPCC, 2013), estas masas se han visto drásticamente afectadas por las nuevas condiciones climáticas. Según se indica en la estrategia Nacional de Glaciares (CECS, 2009) el daño es tal, que la gran mayoría de los glaciares chilenos presenta un claro retroceso y adelgazamiento en el último siglo (Rivera, Bown, Acuña, & Ordenes, 2008) que se ha visto incrementado en las últimas décadas (Rignot, Rivera, & Casassa, 2003), lo que afecta a la escorrentía y los recursos hídricos aguas abajo (nivel de confianza medio) según el Resumen para responsables de políticas del IPCC (2014). Sumado a esto debe considerarse el aumento creciente de la demanda de agua para las necesidades humanas, combinada con una disminución de la oferta natural debido a los cambios climáticos, dando cuenta del creciente riesgo que enfrenta el país en cuanto a seguridad hídrica.

Según el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO, la Seguridad Hídrica se define como

“La capacidad de una población para salvaguardar a nivel de cuenca el acceso al agua en cantidades adecuadas y con la calidad apropiada para sostener la salud de la gente y de los ecosistemas, así como para asegurar la protección eficaz de vidas y bienes durante desastres hídricos – inundaciones, deslizamientos y hundimientos de terreno y sequías–” (Jimenez-Cisneros, 2015, p. 21-22).

En efecto, se reconoce la importancia de la seguridad hídrica para el desarrollo social, económico y ambiental, por lo que resulta importante comprender una visión amplia del papel del agua en la sociedad, no sólo enfatizando en la disponibilidad del recurso hídrico, sino en un sentido integral, definiendo los requerimientos a los que la humanidad debiera orientar los esfuerzos, reconociendo las limitaciones de gestión e infraestructura que se presentan en la práctica, para alcanzar una adecuada gestión del agua.

En este sentido, las técnicas de gestión adaptativa de los recursos hídricos, entre ellas la planificación de escenarios, los enfoques basados en el aprendizaje y las soluciones flexibles y de bajo riesgo, pueden ayudar a crear resiliencia para los cambios e impactos hidrológicos inciertos causados por el cambio climático (IPCC, 2014).

Por lo señalado en los párrafos anteriores, y, sobre la base de esta problemática nace la pregunta:

¿Cuáles serán los glaciares más pronto a desaparecer si continúan perdiendo masa y cómo ello alterará los balances hídricos de las cuencas de Chile central?

Para otorgar una respuesta satisfactoria a este cuestionamiento, se torna fundamental prever los cambios a los que se pueden enfrentar los glaciares en un futuro, ya que estos ponen en riesgo el recurso hídrico para la población que utiliza este recurso para diversas actividades, sobre todo en Chile central, donde se concentra la mayor cantidad de habitantes con un total de 11.645.801, lo que corresponde al 69,2 % de la población chilena (INE, 2017), y es la zona donde se presenta la mayor superficie de hielo fuera de Patagonia, con 939,5 km² (4,46 % del país, correspondiente a 2.615 glaciares catastrados) según los inventarios de las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo, Cachapoal, Tinguiririca, Mataquito y Maule, incluyendo numerosos glaciares descubiertos y una importante proporción de glaciares rocosos (CECS, 2009).

Sumado a esto, la importancia de la zona se realiza al considerar que “los glaciares pueden llegar a contribuir hasta con un 60-70 % del caudal de escorrentía en los meses de verano de años secos” (Peña & Nazarala, 1987 en CECS, 2009, p. 76). “También son importantes para la generación de energía (hidroelectricidad), los riesgos potenciales y las actividades turísticas y recreativas que pueden albergar” (CECS, 2009, p. 76). Además, han presentado retrocesos inferiores a los de la zona austral, pero que sin embargo “pueden tener grandes repercusiones en la disponibilidad de recursos hídricos en el futuro (Coudrain, Francou, & Kundzewicz, 2005), en especial por la fuerte competencia por la adquisición y asignación de acciones de agua (Rosegrant et al., 2000)” (CECS, 2011, p. 25)

Actualmente se encuentra en trámite la Ley Marco de Cambio Climático, la cual apunta a adaptar la normativa chilena a los tratados internacionales firmados por Chile para enfrentar el Cambio Climático. Dentro de las metas que señala la ley, establece alcanzar la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero al año 2050 para impulsar al país hacia un desarrollo sustentable.

En concordancia con lo expuesto es que en el presente documento se dispone a generar futuros escenarios para algunos de los glaciares de la zona central de Chile (Monos de Agua, Juncal Norte, Juncal Sur, Olivares Alfa, Olivares Beta, Olivares Gama, Volcán Marmolejo, Volcán San José, Volcán Tupungatito, La Paloma, El rincón, Cipreses, Universidad, Volcán Peteroa y Volcán Azufre), elegidos en base a la información de variaciones areales recopiladas por el Centro de Estudios científicos (CECS) en el informe “Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas” publicado por la Dirección General de Aguas (DGA), para finalmente realizar proyecciones al año 2050, considerando los escenarios climáticos más óptimos y más desfavorables propuestos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC).

El motivo de selección de estos 15 glaciares responde a que son los únicos que poseen información de sus variaciones areales en la zona central, por lo que sus proyecciones climáticas podrán ser interpretadas respecto de data histórica.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una revisión bibliográfica de los comportamientos de los glaciares centrales de Chile y definir la línea de base climática, con el fin de ver proyecciones futuras de las variables climáticas, a mediados del siglo XXI.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

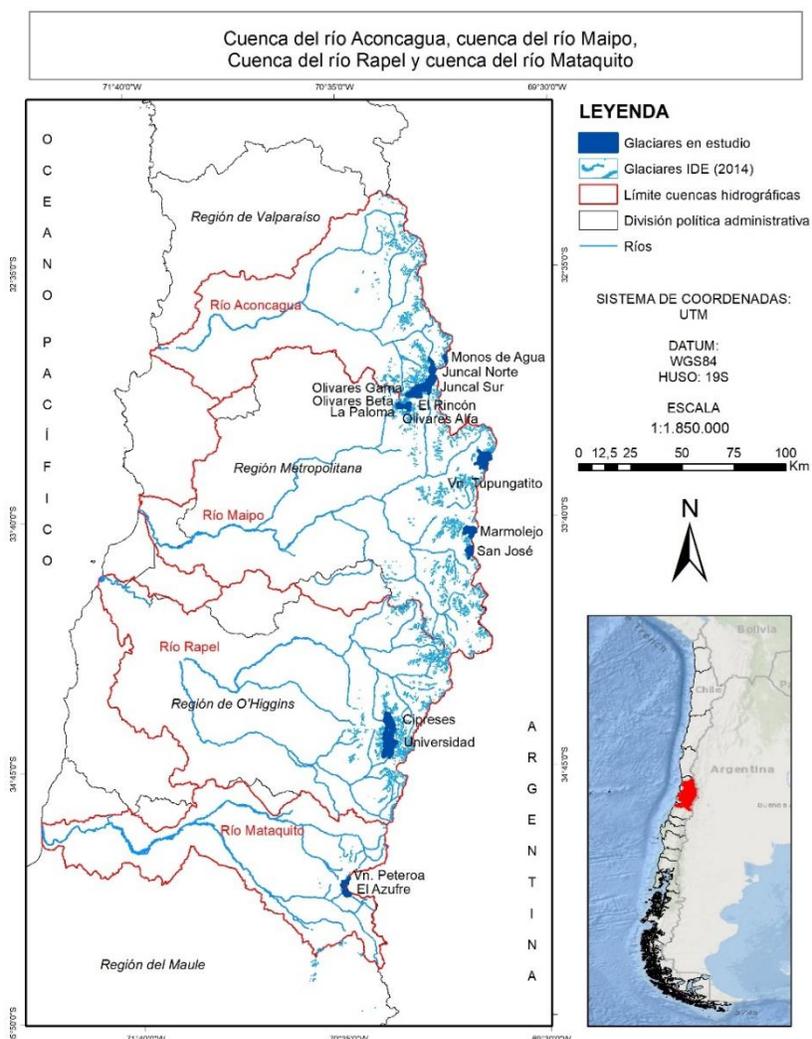
- 1.- Describir y sistematizar las características de los glaciares en estudio y sus variaciones areales.
- 2.- Estimar las trayectorias de cambios climáticos y sus efectos en los glaciares.
- 3.- Analizar la relación entre las proyecciones de cambios climáticos y las características de los glaciares en estudio.

CAPÍTULO 2: AREA DE ESTUDIO

2.1 ZONA CENTRAL DE CHILE

El área de estudio (ver figura 1) corresponde a los glaciares más representativos de la zona central de Chile (ver tabla 1) y que cuentan con registro de variaciones areales, estudiados por el Centro de Estudios Científicos (CECS) en el documento “Variaciones recientes de glaciares en Chile, según sus principales zonas glaciológicas”, publicado por la Dirección General de Aguas (DGA) el año 2011. Comprende entre los 32,9 °S Y 35,3 °S de latitud, abarcando las cuencas del Río Aconcagua, Río Maipo, Río Rapel y Río Mataquito.

FIGURA 1: ÁREA DE ESTUDIO



Fuente: Elaboración propia (2019)

La extensión del área glaciar es de 210,08 km², equivalente al 0.02 % de la superficie del territorio nacional. De acuerdo al CENSO 2017 estas cuencas concentran aproximadamente el 69.2 % de la población nacional, vale decir 11.645.801 habitantes de un total nacional de 17.574.003 habitantes.

TABLA 1: GLACIARES A ESTUDIAR EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE

NOMBRE GLACIARES	TIPO DE GLACIAR	COORDENADAS X	COORDENADAS Y
Monos de Agua	Glaciar de Montaña	403759,8481	6350008,656
Juncal Norte	Glaciar de Valle	397726,9647	6345662,975
Juncal Sur	Glaciar de Valle	395953,7768	6336763,987
Olivares Gama	Glaciar de Valle	390760,4814	6335157,706
Olivares Beta	Glaciar de Montaña	387932,8451	6333078,451
El Rincón	Glaciar de Montaña	380608,3132	6327135,74
La Paloma	Glaciar de Montaña	382193,6804	6327037,555
Olivares Alfa	Glaciar de Valle	386139,0406	6326780,053
Vn. Tupungatito	Glaciar de Montaña y Valle	423326,7473	6302499,59
Marmolejo	Glaciar de Montaña	415180,7818	6267102,051
San José	Glaciar de Montaña y Valle	415666,6998	6257568,13
Cipreses	Glaciar de Montaña y Valle	377856,333	6172593,445
Universidad	Glaciar de Valle	377978,9502	6160562,465
Vn. Peteroa	Glaciar de Montaña	355184,3709	6097420,467
El Azufre	Glaciar de Montaña	356616,1864	6092571,206

Coordenadas UTM 19 Sur. Fuente: Elaboración propia (2019)

A continuación, se presenta de manera general el área de estudio según su geomorfología, geología, clima, hidrografía, flora y fauna y las actividades antrópicas más relevantes que se desarrollan; esto según el informe anual de Medio Ambiente publicado el 2016 por el Instituto Nacional de Estadística (INE)

2.1.1 GEOMORFOLOGÍA

En relación a la ubicación de los glaciares, estos se ubican en la Cordillera de Los Andes, que se presenta a lo largo de todo Chile, con altitudes que bordean entre los 3500 y 6000 msnm en la zona central. Esta unidad de relieve es determinante para las características climáticas, ya que afecta de manera considerable la distribución de las precipitaciones.

Cabe destacar que el relieve al ser montañoso genera una tendencia a la inestabilidad de los sistemas de interface superficial, ya que no permite un desarrollo significativo de los perfiles de suelo, al no existir procesos de ajustamiento con su ambiente. Esto se traduce en la existencia de suelos jóvenes.

2.1.2 GEOLOGÍA

El modelado de la Cordillera de los Andes varía a lo largo del territorio, pero aproximadamente a la latitud de Santiago, el modelado lo determinan dos aspectos principales: la presencia de restos de la antigua peniplanicie Terciaria, producto de un estado de evolución avanzado del relieve, y la existencia de profundos valles resultantes de una erosión extremadamente intensa posterior al solevantamiento, lo que imprime un aspecto alpino.

2.1.3 CLIMA

Por su parte el clima del área de estudio resulta diverso, siendo los factores fundamentales, que inciden en el clima del territorio, la latitud, el relieve y la influencia oceánica del gran frente marino existente.

Según Santibáñez (1993) la zona central de Chile presenta un clima templado tipo mediterráneo, caracterizado principalmente por la presencia de una estación seca prolongada, y un invierno bien marcado con temperaturas extremas que oscilan entre los 0 °C y los 30 °C; con una media de 19 °C en el periodo de verano, y 7 °C en promedio para el invierno. Cabe destacar que mientras las temperaturas en el océano y a lo largo de la costa han disminuido (-0.15 °C/década), las estaciones en el valle central muestran un ligero aumento, y las temperaturas en la cordillera muestran un aumento significativo de casi 0,25 °C por década. El enfriamiento costero y el calentamiento sobre los Andes se verifica en la zona central y norte de Chile (Falvey & Garreaud, 2009).

En cuanto a las precipitaciones en Chile Central aumentan de la costa al interior y de norte a sur. Además, se encuentran asociadas al fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), con una relación positiva de la pluviometría y la temperatura superficial del mar entre los 32° S y 38° S (Rutllant & Fuenzalida, 1991 en Bown, 2004).

2.1.4 HIDROGRAFÍA

Como consecuencia de la disposición del relieve y la estrechez del territorio en general, los ríos del país son de corta longitud, de escaso caudal, torrentosos e inapropiados para la navegación, pero con gran potencial hidroeléctrico. Además, varían según la ubicación geográfica; los ríos de la zona mediterránea aumentan su caudal con los deshielos, el que llega a su máximo a fines de diciembre y su clima es de alta montaña en la cordillera y más templado en la costa, debido al efecto regulador de las masas de agua del pacífico. Los principales cuerpos de agua son el Maipo, Rapel y Mataquito. En el centro-sur del país los ríos presentan un régimen mixto, con crecidas primaverales cada vez menores y mayor caudal durante el invierno.

2.1.5 FLORA Y FAUNA

Respecto a la flora de la zona central según cartografías del Instituto Geográfico Militar (IGM, 2016) se destaca de este a oeste, desde la cordillera de la costa hasta la planicie costera el bosque esclerófilo, por otro lado en la cordillera de la costa y la planicie intermedia se encuentra el desarrollo de policultivos, ganadería y forestación (esta condición plantea importantes desafíos en términos de gestión y protección de los recursos hídricos, considerando que en las regiones de Chile central la actividad agrícola es un consumidor importante de agua (CEPAL & OCDE, 2016)), y en menores zonas del llano central o planicie intermedia se presenta el espinal. Más al oeste, en la precordillera andina se presenta nuevamente matorral esclerófilo y finalmente en la Cordillera de los Andes se desarrolla Matorral andino. En la fauna de la zona central se destacan especies como el degú, lauchón, lauchita de espinos, coipo, comadreja, zorro culpeo, chilla, gato montés, quique, puma y roedores. También existe una gran abundancia de insectos. Respecto de las aves en esta zona, en el sector costero se pueden presenciar especies como la gaviota, cormorán y pelícano; en los valles y en la cordillera habita el cóndor, el búho, peuco, zorzal, chincol, loica, pájaro carpintero, diuca, tórtola, queltehue y la perdiz.

2.1.6 USO DE SUELO Y ACTIVIDADES ANTRÓPICAS

Actualmente, en los valles de Chile Central la actividad agrícola resulta un consumidor importante de agua (CEPAL & OCDE, 2016 en INE, 2016) específicamente se concentra su desarrollo en las zonas próximas a las grandes y pequeñas urbes.

Según es señalado en el Quinto Informe Nacional de Biodiversidad de Chile, para que este paisaje se constituyera fue necesaria la habilitación de suelos para generar tierras cultivables, el desarrollo urbano y la plantación de especies exóticas como *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, los que se señalan como los principales factores de cambio, lo que consecuentemente ha significado mayor presión por nutrientes, debido a descargas puntuales y arrastre o lixiviación de zonas agropecuarias y de mayores vertidos residuales urbanos concentrados en menos puntos de descarga, dando lugar a una pérdida progresiva y degradación de los bosques de ambientes semi-áridos sobre toda la región.

Por otro lado, existen estudios en países de Europa y América Central que han reportado que la deforestación está afectando la producción de agua y vida útil de las represas hidroeléctricas, esto último debido a los altos niveles de sedimentación que son producidos por la pérdida de cobertura forestal (Haigh, Jansky, & Hellin, 2004; Mwendera, 2006).

Con respecto al desarrollo agrícola, en los últimos 20 años, “el área de plantaciones de cultivos de paltos (*Persea americana*) se ha triplicado, y el área de viñedos se ha duplicado a costa de valiosos últimos parches de ecosistemas mediterráneos que han quedado confinados a cerros isla y sin conexión entre ellos. Asimismo, junto con la

habilitación de suelos para uso agrícola, las variaciones existentes en el bosque nativo de la zona central del país se deben también a las quemadas realizadas y a los incendios registrados hasta dicho periodo” (MMA, 2014).

En este sentido,

“estimaciones indican que en 2050, la mayoría de los valles productores de vino Premium en Chile (Maipo, Cachapoal y Colchagua) se volverán en su mayoría inadecuados para producir por efectos del cambio climático, y otros valles (Aconcagua y Maule), disminuirán su capacidad de producción considerablemente lo que conducirá a la necesidad de un mayor uso del agua, dado lo cual, de no implementar adaptaciones en sus prácticas de cultivo, afectarán los ecosistemas que proveen de dicho servicio. Por otro lado, muchas de las actividades agrícolas en Chile Central dependen del agua que es provista por los deshielos de las cuencas, las cuales son particularmente vulnerables al cambio climático, dado que serían afectadas por cambios en temperaturas y precipitaciones. Para el Valle de Maipo, por ejemplo, está proyectada una disminución de precipitaciones en un 20 % para el año 2050. Para Aconcagua y Maule, por su parte, también se estima una disminución en el agua disponible de descarga de entre 20 % y 30 %. El aumento de la demanda sobre el recurso agua, ubicaría a los ecosistemas de agua dulce de Chile en alto riesgo” (MMA, 2014, p. 41).

2.2 CUENCAS

Actualmente Chile cuenta con una superficie de hielo de 23.000 km² aproximado, según el último registro proporcionado por “Glaciares de Chile” (DGA, 2014). Dentro de este marco, la zona central posee una superficie glaciaria aproximada de 900 km², repartidos en más de 1.300 glaciares. Este gran número se debe a las altas cumbres cordilleranas y las precipitaciones invernales. A su vez, las cuencas de mayor tamaño (río Maipo y río Rapel) concentran la mayor superficie y cantidad de glaciares (ver tabla 2).

TABLA 2: SUBCUENCAS DE LA ZONA CENTRAL, CON GLACIARES INVENTARIADOS

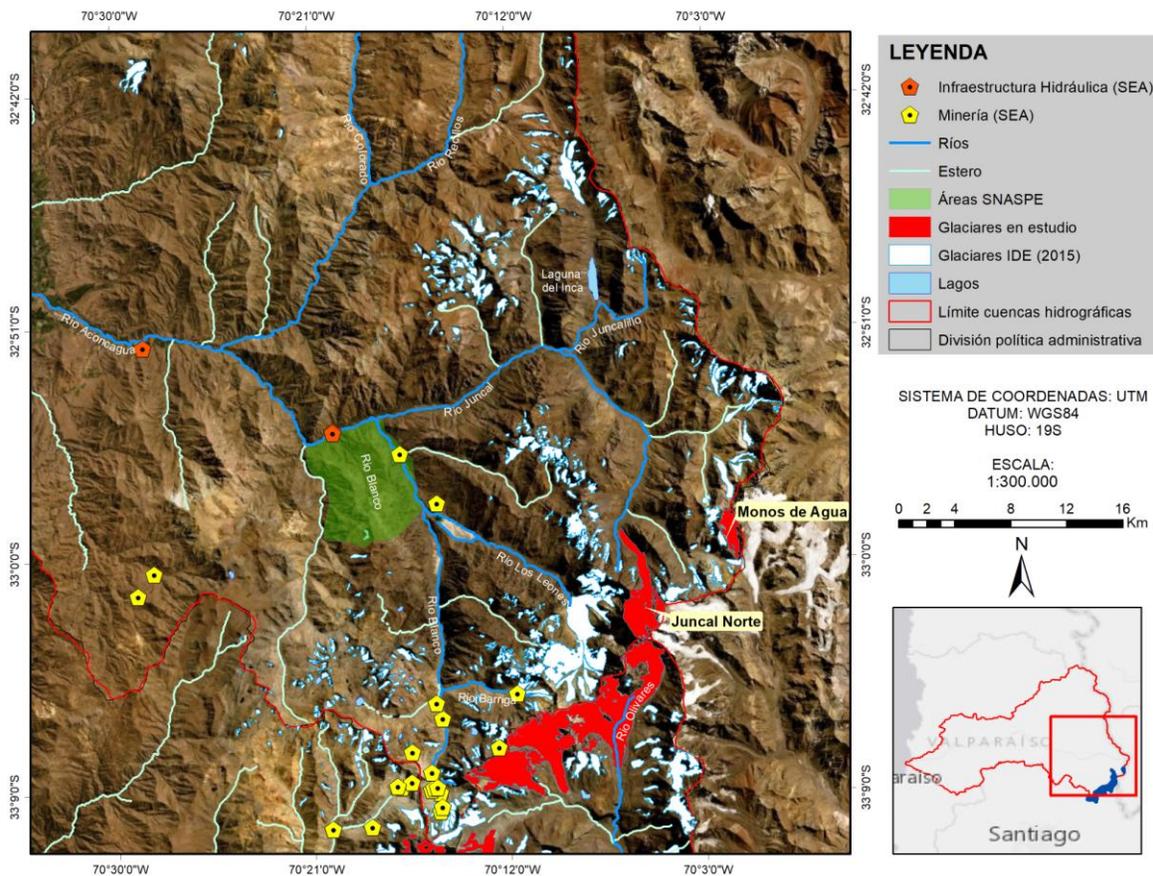
Aconcagua	Río Maipo	Río Rapel	Río Mataquito
<ul style="list-style-type: none"> - Río Juncal antes junta Estero Juncalillo - Río Juncal Antes Junta Estero Juncalillo y Junta Río Blanco - Río Blanco - Río Aconcagua entre río Blanco y río Colorado - Río Colorado antes junta estero Riecillos - Estero Riecillos - Río Colorado entre estero Riecillos y río Aconcagua - Estero Quilpué 	<ul style="list-style-type: none"> - Río Maipo bajo junta río Negro - Río Maipo entre río Negro y río Volcán - Río Volcán - Río Yeso - Río Maipo entre río Volcán y río Colorado - Río Colorado antes junta río Olivares - Río Olivares - Río Colorado entre río Olivares y río Maipo - Estero Angostura antes junta estero Paine - Río Molina - Río San Francisco - Río Mapocho entre río San Francisco y bajo junta estero Arrayán - Estero Colina 	<ul style="list-style-type: none"> - Río Cachapoal antes junta río Cortaderal - Río Cortaderal en desembocadura Laguna Pejerreyes - Río Cortaderal entre Laguna Pejerreyes y río Cachapoal - Río Cachapoal entre río Cortaderal y río Pangal - Río Pangal (río Paredones) en junta con río Blanco - Río Blanco - Estero Coya - Río Cachapoal entre río Pangal y río Claro - Río Claro - Río Claro hasta estero Tipaume - Río Tinguiririca hasta bajo junta río Las Damas - Río Tinguiririca entre río Las Damas y río del Azufre - Río Azufre hasta río Portillo - Río Azufre entre río Portillo y río Tinguiririca - Río Tinguiririca entre río Azufre y río Clarillo - Río Clarillo - Río Claro 	<ul style="list-style-type: none"> - Río Teno bajo junta río del Pellejo - Río Teno entre río del Pellejo y bajo junta río del Infiernillo - Río Claro - Río Colorado bajo junta Valle Grande - Río Colorado entre Valle Grande y bajo estero Las Mula - Estero Volcán
Numero de Glaciares inventariados:			
101	647	407	81
Área glaciar (km²):			
58,89	421,90	328,88	31,91

Fuente: Elaboración propia en base a la Estrategia Nacional de Glaciares (CECS, 2009)

2.2.1 CUENCA DEL RÍO ACONCAGUA

La hoya del río Aconcagua (ver figura 2) se encuentra en el extremo sur de la zona de los Valles Transversales o Semiárida de la Región de Valparaíso. Su extensión alcanza una superficie de 7.340 Km².

FIGURA 2: CUENCA DE RÍO ACONCAGUA



Fuente: Elaboración propia (2019)

El río Aconcagua se forma de la confluencia de los ríos Juncal, que proviene del oriente, y el río Blanco, que viene del sureste, a 1.430 m de altitud y posteriormente recorre 142 km hasta su desembocadura en el océano Pacífico, específicamente en la bahía de Concón.

Sus afluentes más caudalosos se localizan en la ribera norte y sus tributarios se encuentran en las cabeceras del interior de la cordillera.

En lo que respecta a los estudios más recientes de inventarios realizados en esta cuenca se encuentra el realizado por Valdivia (1984) en el cual se catastraron 267 glaciares; otro estudio corresponde al de Bown et al. (2008) en el cual se estudió la variación de 159 glaciares descubiertos, con un enfoque en el glaciar Juncal Norte; y de acuerdo a la

información entregada por la DGA, existe un inventario realizado el 2008 que debido a la resolución de las imágenes utilizadas, consideró solo parcialmente los glaciares rocosos (GEOESTUDIOS, 2011)

La cuenca del río Aconcagua es una de las principales cuencas glaciares de la zona central, con 181 Km² de hielo según el último inventario de glaciares de la DGA.

Los glaciares contemplados en el estudio de la cuenca son los siguientes:

- Juncal Norte
- Monos de Agua

2.2.2 CUENCA DEL RÍO MAIPO

Se encuentra ubicada en parte de la Región de de Valparaíso, Región Metropolitana y Región del Libertador Bernardo O'Higgins y abarca una superficie aproximada de 15.273 Km².

El río Maipo se forma de la confluencia de los ríos Mapocho y Colorado. Posee cuatro tributarios importantes en la cuenca alta: el río Volcán, río Colorado, río Yeso y río Olivares

Esta cuenca (ver figura 3) cuenta con 300 km² aproximados de hielo, lo que resulta especialmente relevante porque coincide con la zona más poblada y densa del país, con una población aproximada de 6.7 millones de habitantes (INE, 2012) y por consecuencia su demanda hídrica de agua potable resulta muy alta. Además, existe una gran extensión de cultivos agrícolas de gran valor comercial, por lo que la fuerte presión por los recursos hídricos asociado a estos dos tipos de demanda, complementado por condiciones climatológicas semiáridas, implican un alto estrés hídrico, relevando el rol de los glaciares como proveedor de agua en la temporada estival.

“Cabe destacar que en la cuenca del río Maipo el único inventario de glaciares existente a la fecha corresponde al realizado por Marangunic (1979). Parte de la ejecución de este catastro ha analizado el estudio de la hoya del río Maipo, ríos Mapocho y río Colorado, donde se identificaron 647 glaciares, de los cuales el 39 % corresponde a glaciares rocosos. En esta cuenca, la gran mayoría de los glaciares muestran superficies orientadas hacia el sur, de acuerdo al inventario de Marangunic (1979) alrededor del 4 % de los glaciares están orientados hacia el norte” (GEOESTUDIOS, 2011, p. 17)

Finalmente destaca la importancia de la cuenca para el abastecimiento del Sistema Interconectado Central (SIC). En esta cuenca existen cinco centrales hidroeléctricas, además de bocatomas. En este sentido la presencia de los caudales nivo-glaciares presentan importancia entre los meses de septiembre a noviembre.

Actualmente en la cuenca los glaciares tienen una superficie aproximada de 267 km².

“En la cuenca del río Rapel se han realizado dos inventarios Caviedes (1979) y Valdivia (1984). El primer inventario realizado en 1979 abarca la cuenca del río Cachapoal y se inventariaron 146 glaciares con un área de 222,2 km². El segundo inventario se realizó en la cuenca del río Tinguiririca y se catastraron 261 glaciares con una superficie total de 106,46 km²” (GEOESTUDIOS, 2011, p. 18).

Los glaciares contemplados en el estudio de la cuenca son los siguientes:

- Cipreses
- Universidad

2.2.4 CUENCA DEL RÍO MATAQUITO

La cuenca del río Mataquito (ver figura 5) está situada en la Región del Maule. Su superficie abarca una extensión de 6.335 km² aproximadamente y es la más pequeña de las cuencas analizadas.

El río Mataquito se origina de la confluencia del río Teno (principal afluente del sistema), que drena la porción norte del área, y del río Lontué, que drena la porción sur. La unión entre ambos ríos se produce a 12 km al W de Curicó para luego escurrir 95 km en dirección W hasta desembocar en mar abierto.

La cuenca del río Mataquito se encuentra bajo la influencia de un clima mediterráneo, por lo que existen al menos dos meses consecutivos del verano con déficit hídrico. En la cordillera andina el clima está influenciado mayormente por el efecto que ejerce la altitud sobre la continentalidad, donde los contrastes térmicos resultan más acentuados que en el litoral.

Cabe destacar la influencia volcánica del complejo volcánico Planchón-Peteroa-Azufre, donde se registra su última erupción después de 1964. Actualmente son considerados extintos los volcanes Azufre y Peteroa, no así el volcán Planchón que se construye con varios cráteres y estructuras caldéricas en la cima. “En la actualidad, este presenta en su cima una actividad fumarólica de vigor alternante, abundante en vapor de agua y con ocasional emisión de ceniza fina de erupciones anteriores” (SERNAGEOMIN, s/f, párr. 2), por lo que constituye un riesgo constante en la generación de lahares, dada la extensa cubierta de hielo y nieve que cubre particularmente el sector del Azufre.

CAPITULO 3: MARCO TEORICO

3.1 GLACIARES

3.1.1 DEFINICIÓN DE GLACIAR

Existe una considerable variedad de definiciones de glaciar, ello, debido a las múltiples formas que estos adoptan, variando en volumen y dinámica a lo largo del tiempo, esto según el contexto en el cual se constituyen, siendo diverso su ambiente orográfico, la latitud a la que se encuentran y la evolución de estos, proceso en el cual influye fuertemente el sistema climático junto con el medio geográfico físico. El presente estudio está focalizado en torno a los glaciares descubiertos o blancos, sin embargo, es preciso ver algunas definiciones para comprender la importancia de estos últimos en la zona de estudio.

Una de las definiciones que ha sido más referenciada en el tema es la de Libourty (1956): “toda masa de hielo perenne, formada por acumulación de nieve, cualesquiera sean sus dimensiones y su forma (...) que fluye bajo su propio peso hacia las alturas inferiores”.

Otra definición destacada es la propuesta por IPCC (2007), que define glaciar como una

“masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo (por deformación de su estructura interna y por el deslizamiento en su base), encerrado por los elementos topográficos que lo rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes; la topografía del lecho de roca es el factor que ejerce mayor influencia en la dinámica de un glaciar y en la pendiente de su superficie. Un glaciar subsiste merced a la acumulación de nieve a gran altura, que se compensa con la fusión del hielo a baja altura o la descarga en el mar” (IPCC, 2007, p. 82)

Esta clasificación resulta esencialmente morfológica, pudiendo así, adquirir numerosas formas, desde glaciares que producen témpanos en fiordos y lagos, como campos de hielo al sur de Sudamérica, hasta los llamados rocosos, cubiertos por una capa de detritos y que presentan una morfología superficial que evidencia flujo de hielo subyacente.

Por otro lado, según la UNESCO (2011), glaciar es toda masa de hielo perenne, y posiblemente neviza y nieve, originada sobre la superficie por la recristalización de nieve y otras formas de precipitación sólida y mostrando evidencia de flujo en el pasado o presente. De igual modo define “glaciarete” como un glaciar muy pequeño, típicamente de menos de 0,25 km² (25 ha) de extensión sin marcados patrones de flujo visible en

superficie. Se señala que debe permanecer por dos años, que puede tener forma indefinida y que ocupan áreas protegidas del terreno (DGA, 2013).

El área aquí definida para Glaciarete difiere sustancialmente de la establecida por el CECS (0,01 km² versus 0,25 km²).

La definición establecida por el GTOS (*Global Terrestrial Observing System*) de las Naciones Unidas el 2007, y considerada la mejor según el catastro de glaciares de Chile central (GEOESTUDIOS, 2011, p. 23), es la siguiente:

“Glaciar se define como una masa de hielo en la superficie terrestre, que fluye pendiente abajo (por deformación interna y por deslizamiento en la base), y restringida por la topografía del entorno (por ejemplo las laderas de un valle o las cumbres que lo rodean); la topografía del lecho es la mayor influencia en la dinámica y pendiente de la superficie de un glaciar. El glaciar se mantiene por la acumulación de nieve en las cotas altas, balanceada por la fusión a cotas bajas o por la descarga al mar (IPCC, 2001). Casquete de hielo es una masa en forma de domo y que cubre la zona alta de una región (menor que 50.000 km² de área terrestre) que es considerablemente menor en extensión que las sábanas de hielo”.

Esta definición resulta muy similar a la de UNESCO e IPCC, agregando el reconocimiento de casquete y su superficie mínima para ser considerado de tal forma.

Por último, la DGA (CECS, 2009, p. 12), en la Estrategia Nacional de Glaciares, define el concepto de glaciar de una manera más operativa como

“toda superficie de hielo y nieve permanente generada sobre suelo, que sea visible por periodos de al menos dos años y de un área igual o superior a 0,01 km² (una hectárea). O cualquier superficie rocosa con evidencia superficial de flujo viscoso, producto de un alto contenido de hielo actual o pasado en el subsuelo”.

En este sentido la clasificación hace mención al tiempo de permanencia del hielo y desde la misma Estrategia nacional de glaciares hacen mención a que esta definición pudiera no incluir algunos glaciares reconocidos por la academia (como los glaciaretes) o bien pudiera incluir algunos cuerpos que no corresponderían a glaciares según otras definiciones (como los glaciares de roca inactivos o fósiles), pero reconocen a su vez que estos sesgos son menores y que no invalidan el valor de la definición, la cual es particularmente sencilla, concisa y clara.

Finalmente cabe destacar que el proyecto GLIMS (*Global Land Ice Measurements from Space*) estableció para el reconocimiento de glaciares un área mínima de 0,01 km², una duración de al menos dos años, la evidencia de flujo y contenido de hielo actual o pasado en el subsuelo.

Queda claro que existen diferentes definiciones, por lo que puede llegar a ser difícil clasificar un glaciar, además de considerar que un glaciar puede ocupar distintas posiciones entre el pasado y el presente, pudiendo dejarlo en un término medio entre dos definiciones.

Cabe recordar que cualquiera sea la tipología de los glaciares, en su gran mayoría y en su origen son formas remanentes de la última glaciación, la que indicó su retirada final hace aproximadamente 14.000 años. Estas condiciones climáticas no se han vuelto a repetir, es decir,

“las condiciones originales para que estos cuerpos de hielo mantengan oscilaciones menores dentro de un balance de masa equilibrado o que aseguren su permanencia, no existen hace miles de años, por lo tanto no son recursos renovables a escala humana. Ningún glaciar que se haya derretido se ha vuelto a formar durante el holoceno. Solo han existido pequeños periodos de frío que les han permitido mantenerse y posiblemente recuperarse” (Ferrando, 2014, p. 4)

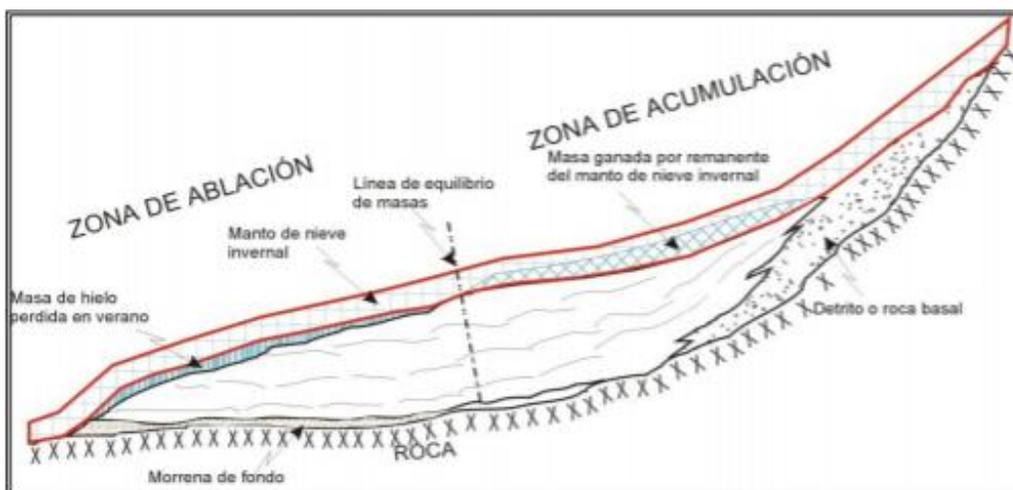
Finalmente

“no deben mencionarse como “glaciares” geoformas que no estén constituidas por hielo, o por mezclas de hielo y detritos. En particular, no son glaciares geoformas que son depósitos de materiales detríticos transportados por glaciares actuales o en el pasado; estas geoformas corresponden, habitualmente, a algunos de los tipos de “morrenas”. Tampoco son glaciares, geoformas con hielo, pero de espesor de hielo insuficiente como para deformarse por su propio peso (incluido el del hielo y el de la eventual sobrecarga de detritos rocosos). Estas geoformas, con espesores de hielo insuficiente para deformarse, deben mencionarse como constituidas por “hielo inactivo”. Los “campos de nieve”, son extensiones de nieve que pueden persistir dos o más años, pero que no tienen espesores (y cargas) suficientes como para deformarse por su propio peso. Sin embargo, por propósitos hidrológicos UNESCO los incorpora con el número “7” correspondiente a la clasificación “Glaciarrete / Campo de nieve” (GEOESTUDIOS, 2011, p. 28).

3.1.2 BALANCE DE MASA ANUAL

Los glaciares poseen una zona de acumulación y una zona de ablación, separadas por una imaginaria línea de equilibrio de masas (ver figura 6). Existen diversas formas de estimar el balance de masa, ya sea estudiando su variación de volumen y densidad, lo que se conoce como el método geodésico o cuantificando los procesos de acumulación y ablación en su superficie, lo que constituye el método clásico glaciológico (CECS, 2009).

FIGURA 6: PERFIL VERTICAL POR EL EJE DE UN GLACIAR, MOSTRANDO LA DISPOSICIÓN DE LAS ZONAS DE ACUMULACIÓN Y ABLACIÓN



Fuente: Extraído del Manual de glaciología de la DGA (2008).

En la zona de acumulación, mayoritariamente el glaciar gana masa en un balance anual, de la precipitación nival y de avalanchas más el detrito que estas últimas suelen incorporar, y que logra subsistir al término de la temporada veraniega. Además, existen otros mecanismos que realizan un aporte marginal. La lluvia y la neblina blanca, son uno de ellos, ya que debido a las bajas temperaturas pueden ser integradas por congelamiento en forma de una capa de hielo sobreimpuesto. Otro mecanismo usual es la deriva de nieve desde otras cuencas ocasionadas por tormentas de alta cordillera. La interacción entre la topografía y los vientos puede crear depositaciones de nieve o sectores localizados de ocurrencia de deflación (Rivera, Bown, Napoleoni, Muñoz, & Vuille, 2016).

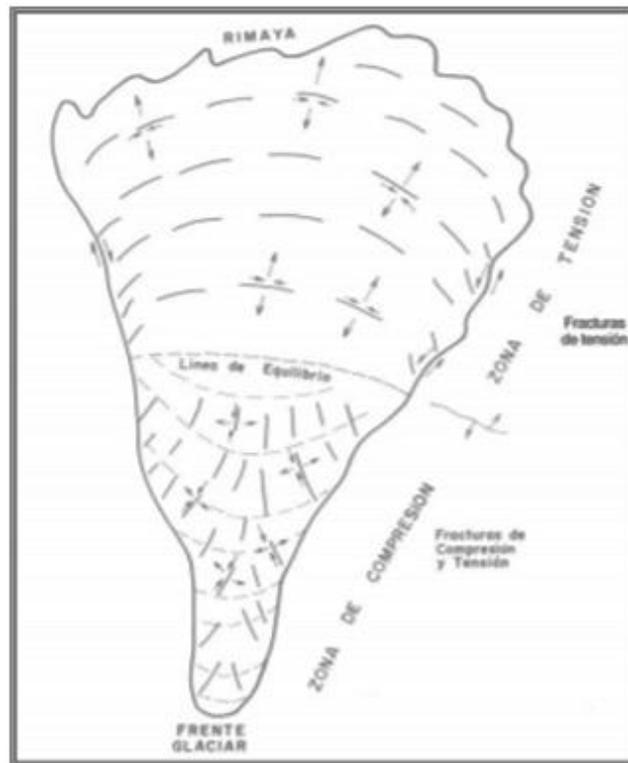
En la Zona de Ablación el glaciar pierde masa, fundamentalmente por la fusión de la nieve o hielo superficial, seguido de escorrentía, debido a la transferencia de energía proveniente de la atmósfera mediante los procesos de radiación y flujos turbulentos en el aire adyacente a la superficie. Otras formas de ablación son la deflación y la sublimación (Rivera, Bown, Napoleoni, Muñoz, & Vuille, 2016).

El frente del glaciar es estable cuando el balance anual de masas es igual a cero, vale decir cuando gana tanta masa de nieve en la Zona de Acumulación, como la masa perdida de hielo en la Zona de Ablación; en caso contrario el frente avanza (balance positivo, ganancia neta anual de masa) o retrocede (balance negativo, pérdida neta anual de masa) y se modifica el perfil de la superficie del glaciar (GEOESTUDIOS, 2008).

Según se explica en el Manual de glaciología (GEOESTUDIOS, 2008), la línea de equilibrio altitudinal (conocida como ELA), representa los puntos del glaciar con balance de masa "cero", y por las mismas condiciones de intercambio de masas entre las zonas de acumulación y ablación los espesores de hielo son mayores y por ello las velocidades de desplazamiento del glaciar son también las mayores. Por esto mismo, la Zona de

Acumulación se encuentra en tensión y formación de grietas transversales, mientras que la Zona de Ablación es un campo en compresión, con formación de grietas longitudinales y cordones de compresión (ver figura 7).

FIGURA 7: ESQUEMA EN PLANTA DE CAMPO TEÓRICO DE ESFUERZOS EN UN GLACIAR Y LA DISPOSICIÓN DE LOS SISTEMAS DE FRACTURAS EN LA MASA DE HIELO



Fuente: Extraído del Manual de glaciología de la DGA (2008).

3.1.3 TIPOS DE GLACIARES EN EL ÁREA DE ESTUDIO

3.1.3.1 Según morfología

Clasificación principal, la que pone en evidencia la diversidad glaciar, diferenciándolos por su naturaleza, tamaño y características. Existen dos tipos encontrados en los Andes centrales de Chile:

3.1.3.1.1 *Glaciar de valle*

Se refiere a un glaciar que cubre, ya sea parcial o completamente, el valle de una montaña. Se caracterizan por tener una o más zonas de acumulación, generalmente bien diferenciadas, ubicadas en subcuencas o circos, las cuales confluyen en un valle, más largo que ancho, el cual permite el flujo de hielo en función de la pendiente. No posee lóbulo de derrame y su frente queda circunscrito al valle. Recibe el nombre de glaciar Alpino, por ser la forma típica de varios glaciares de los Alpes, a partir de los cuales se conceptualizó.

3.1.3.1.2 *Glaciar de montaña*

Definidos como glaciares localizados en las partes altas de la cordillera, con formas variables, y donde la evacuación desde las zonas de acumulación (más anchas que largas), se da por medio de una lengua glaciar pequeña (en comparación con un glaciar de valle). Su zona de acumulación es bien definida.

3.2.3.2 Según temperatura

Para definir el tipo de glaciar de acuerdo con su temperatura, es importante determinar hasta que profundidad el hielo es afectado por las condiciones atmosféricas o más específicamente por la temperatura del aire y su variabilidad diaria y estacional. La literatura descriptiva de perfiles de temperatura de hielo se encuentra principalmente asociada a perforaciones para obtener testigos de hielo. Existen dos tipos encontrados en los Andes centrales:

3.1.3.2.1 *Glaciares fríos*

Es un glaciar cuyo hielo tiene una temperatura por debajo del punto de fusión (se encuentra a temperaturas negativas). En este tipo de glaciares, el flujo del hielo se da principalmente por deformación interna ya que el glaciar no se desliza sino que se adhiere al material sub-glacial y el glaciar fluye solamente por deformación de la masa de hielo.

3.1.3.2.2 *Glaciares temperados*

Es un glaciar que en la mayor parte de su masa tiene la temperatura del punto de fusión. El punto de fusión puede variar por la presión (atmosférica o de acuerdo al espesor del hielo), pero en general esta temperatura se define como 0 °C.

Los glaciares fluyen cuando el hielo se deforma o se desliza lentamente sobre el lecho basal si éste tiene una temperatura de 0 °C. Estos glaciares se conocen como glaciares “templados” o “temperados”. Este es el caso de la gran mayoría de glaciares en la Cordillera de los Andes.

3.2 CAMBIO CLIMÁTICO Y VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Es importante resaltar que el concepto de Cambio Climático está sujeto a muchas interpretaciones, confundiendo en muchas ocasiones este concepto con Variabilidad Climática. Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), este se define como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables” (Naciones Unidas, 1992, p. 3), distinguiéndolo de Variabilidad Climática, la cual es atribuida a causas naturales que alteran la composición atmosférica.

Otra definición de Cambio Climático es la del IPCC, que lo delimita conceptualmente como una

“variación del estado del clima identificable (p. ej., mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos periodos de tiempo, generalmente decenios o periodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo” (IPCC, 2014, p. 188).

Por otro lado, el Panel Intergubernamental de Cambio Climático afirma que la Variabilidad Climática

“denota las variaciones del estado medio y otras características estadísticas (desviación típica, fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones del forzamiento externo natural o antropógeno (variabilidad externa)” (IPCC, 2014, p.202)

Es decir, que la diferencia recaería en el periodo de tiempo en que se presente la variación atípica. Sin embargo también han definido “cambio climático abrupto”, debido a algunos fenómenos repentinos que han aportado a que el sistema climático no presente una linealidad, como por ejemplo la rápida reorganización de la circulación termohalina, la fusión masiva del permafrost, o la rápida retirada de los glaciares.

En este sentido las definiciones presentadas por el CMCC y el IPCC difieren en la interpretación de cada concepto, esto debido a que

“el Cambio Climático interactúa con la Variabilidad Climática, y otros factores no Climáticos, haciendo que no siempre sea posible distinguir claramente sus respectivos impactos, teniendo en cuenta que establecer la frontera entre Variabilidad Climática y Cambio Climático, es especialmente difícil en regiones en las que se presenta una fuerte influencia de la Variabilidad Climática en las condiciones corrientes del clima (OMM, 2009), y que el Cambio Climático, es uno de muchos factores que afecta al modo de vida de la gente (IISD et al., 2003)” (Quintero-Angel, Carvajal-Escobar, & Aldunce, 2012, p. 261)

Sin embargo, y pese a las diferencias conceptuales, resulta un hecho innegable, el calentamiento en el sistema climático, ya que

“desde la década de 1950, muchos de los cambios observados no han tenido precedentes en los últimos decenios a milenios. La atmósfera y el océano se han calentado, los volúmenes de nieve y hielo han disminuido, el nivel del mar se ha elevado y las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado” (IPCC, 2014, p. 1).

Basta con decir que

“en el siglo XX la temperatura media de la Tierra aumentó 1 °F, y desde 1970 ha ido aumentando rápidamente. Algunos científicos creen que la temperatura global podría aumentar 2 ° F a 6 °F en el siglo XXI. Esto podría acelerar el deshielo de los casquetes polares, inundar las tierras bajas costeras, hacer a los huracanes más fuertes y provocar cambios importantes en la producción de cultivos y los hábitats naturales (Almanac & Book of Facts, 2006 en Bahena, 2008, p.8-9).

Esto principalmente porque si en el día de hoy, todos los glaciares se derritieran, el nivel del mar subiría alrededor de 70 metros (230 pies) (Bernex & Tejada, 2010).

3.2.1 ANTECEDENTES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CHILE CENTRAL

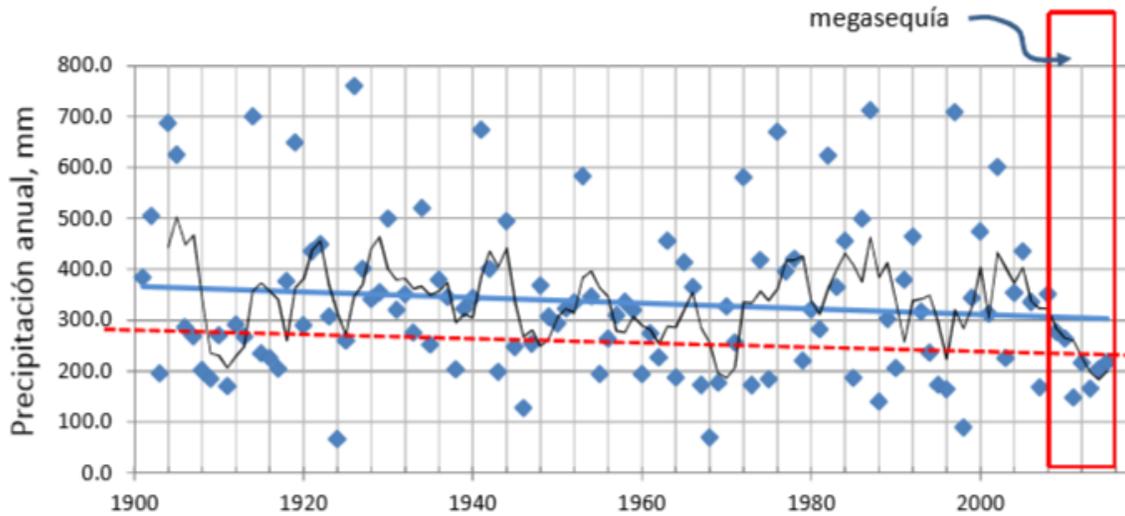
A nivel mundial se ha observado como avanza la aridez sobre regiones agrícolas como California, Atacama y zonas sub saharianas. Atacama, en particular, avanzó hacia el sur a razón de 0,4 a 1 km por año durante todo el siglo XX. De continuar esta tendencia, lo cual es muy probable, estaríamos transitando hacia un país algo más árido, por lo que esto nos lleva a redoblar el paso en materia de gestión hídrica ((CR)2, 2015)

Sumado a esto, conviene subrayar que desde el inicio de los años 2000 estamos cruzando por un periodo seco asociado mayormente a la Oscilación Decadal del Pacífico (ver figura 8), lo que ha traído una alta frecuencia de episodios de aguas oceánicas frías y la consecuente menor pluviometría (Santibañez, 2016).

A esto se agrega que en los últimos años la megasequía 2008-2015

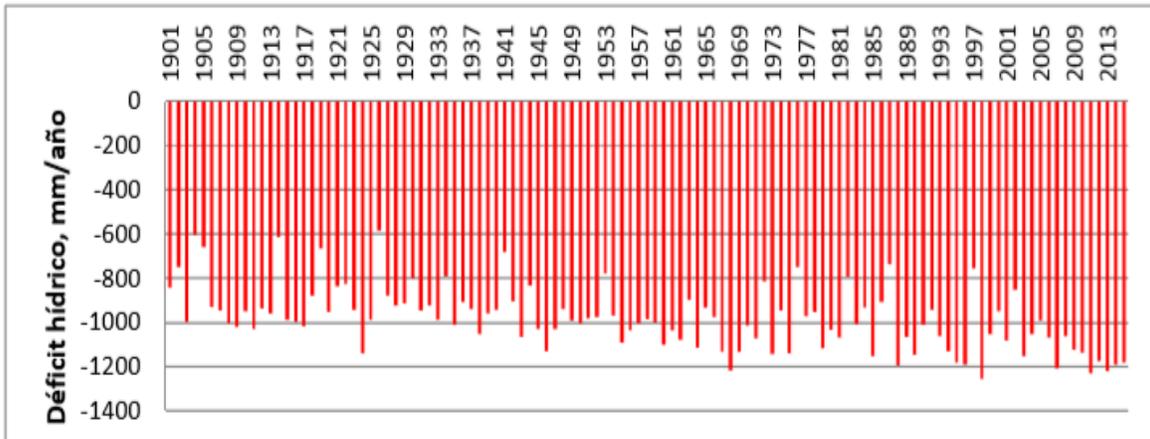
“ha coincidido con los años más cálidos de los últimos 100 años registrando el mayor número de años consecutivos con precipitaciones deficitarias (6 años entre 2010 y 2015) (ver figura 9) y registra el mayor número de años consecutivos con déficit hídrico superior a los 1.000 mm/año (10 años entre 2005 y 2015). Esto último se debe no sólo a la menor pluviometría registrada durante esta sequía, sino al progresivo aumento de la evapotranspiración que la ha elevado desde los 1.150 mm por año en 1900 a más de 1.300 mm/año en los años recientes” (Santibañez, 2016, p. 18-19).

FIGURA 8: PRECIPITACIÓN HISTÓRICA EN SANTIAGO



Nótese que nunca se había producido un periodo consecutivo de 8 años sin ningún año que sobrepase los valores normales. La línea azul corresponde al promedio, la roja al límite de sequía (80 % del promedio) y la negra es la media móvil de 4 años.
 Fuente: Extraído del documento “El cambio climático y los recursos hídricos de Chile” de Santibáñez, F. (2016)

FIGURA 9: PROGRESIVO AUMENTO DEL DÉFICIT HÍDRICO EN SANTIAGO



Muestra que a partir de 2005 se ha producido el periodo más árido de la historia en esta zona. Fuente: Extraído del documento “El cambio climático y los recursos hídricos de Chile” de Santibáñez, F. (2016)

3.2.2 FENÓMENO EL NIÑO-OSCILACIÓN DEL SUR (ENSO)

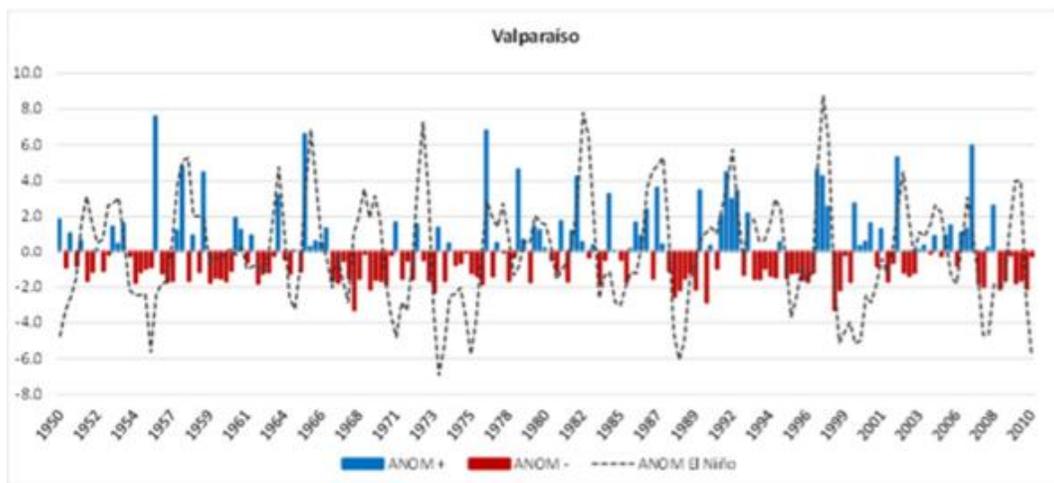
ENSO es una abreviatura comúnmente empleada para referirse a un evento, cuyo nombre completo es El Niño – Oscilación del Sur. Este es un fenómeno de origen natural determinado por un complejo sistema cíclico de interacciones entre el océano y la atmósfera. Este ciclo tiene dos extremos caracterizado por la alternancia entre tres y siete años de temperaturas del océano Pacífico: una fase cálida, conocida como El Niño, y una fase fría, conocida como La Niña

“Las alteraciones de la circulación atmosférica durante años de La Niña incluyen un debilitamiento de los vientos del oeste sobre Sudamérica y una intensificación del anticiclón del Pacífico, elementos que favorecen condiciones más secas que el promedio en Chile central. Por el contrario, durante El Niño tienden a ocurrir condiciones más lluviosas en esta región” ((CR)², 2015, p. 8),

lo que conlleva, dependiendo de la intensidad de cada una de sus fases, consecuencias relacionadas con “desastres naturales de origen meteorológico, tales como lluvias intensas, tormentas y ciclones tropicales, y, consecuentemente, inundaciones, marejadas de tempestad y deslizamientos de tierras, entre otros” (INE, 2016).

A continuación, las series de tiempo muestran una cierta regularidad entre los ciclos ENSO cálidos y fríos. Durante los ciclos cálidos, correspondientes al evento de El Niño las precipitaciones tienden a ser más abundantes. Inversamente, los eventos fríos (La Niña) tiende a provocar sequias persistentes. En la figura 10 se observa la fuerte relación entre las anomalías de la temperatura de la superficie del mar y las anomalías de la precipitación en la zona central:

FIGURA 10: CICLOS DE EL NIÑO-LA NIÑA EN VALPARAÍSO, DESDE 1950



Fuente: Extraído del informe “El cambio climático y los recursos hídricos de Chile” de Santibáñez (2016)

Entre los años 2010-2014 el territorio comprendido entre las regiones de Coquimbo y la Araucanía experimentó un déficit de precipitaciones cercano al 30 %, denominado “megasequía”, la que a su vez ocurrió en la década más cálida de los últimos 100 años, exacerbando el déficit hídrico a través de la evaporación desde lagos, embalses y cultivos. Por otro lado,

“en febrero de 2015 comenzó un evento Niño, que fue bastante agudo por sus características y llegó a ser el tercero más intenso desde 1950, siendo probablemente el causante de una primavera más lluviosa en la zona central y más seca en la zona sur” (Dirección Meteorológica de Chile, 2015 en INE, 2016, p. 169),

sin embargo a pesar del intenso desarrollo del evento El Niño en dicho año, el déficit de precipitación se mantuvo en la zona central del país.

Históricamente (ver tabla 3), bajo condiciones neutras puede haber déficit o superávit de precipitación en Chile central, pero este evento, denominado megasequía, no tiene análogos en el último milenio de acuerdo a las reconstrucciones climáticas en base a mediciones dendrológicas de cipreses en las regiones de Valparaíso y O’Higgins, lo que sugiere la actuación de otros factores climáticos en la mantención e intensidad de la megasequía.

TABLA 3: EPISODIOS HISTÓRICOS DEL FENÓMENO DE LA NIÑA

INICIO	FIN
Marzo, 1954	Febrero, 1957
Agosto, 1961	Mayo, 1962
Marzo, 1964	Marzo, 1965
Septiembre, 1967	Mayo, 1968
Junio, 1970	Febrero, 1972
Abril, 1973	Agosto, 1974
Agosto, 1974	Junio, 1976
Agosto, 1983	Febrero, 1984
Septiembre, 1984	Julio, 1985
Abril, 1988	Junio, 1989
Agosto, 1995	Abril, 1996
Junio, 1998	Julio, 2000
Septiembre, 2000	Marzo, 2001
Septiembre, 2007	Junio, 2008
Junio, 2010	Marzo, 2011
Agosto, 2011	Febrero, 2012

Fuente: Climate Prediction Center (NOAA), a través del Servicio Hidrogeográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA, 2012)

3.2.4 TEMPERATURAS

Chile Central, ha experimentado un gradual aumento de las temperaturas atmosféricas, desde mediados de la década de los 70, a excepción de la franja costera donde las temperaturas se han mantenido e incluso disminuido ((CR)2, 2015). El incremento más evidente se da entre los 2000 y 3000 msnm, lo que corresponde precisamente a la altura de las zonas de ablación de los glaciares, donde el incremento de T° genera un mayor derretimiento y por ende una mayor reducción de área (CECS, 2011). Estos rasgos son consistentes con el cambio climático ocasionado por la emisión de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera terrestre.

3.2.5 PRECIPITACIONES

Por otra parte, respecto a las precipitaciones, se detectó la disminución de los montos anuales, en especial en las estaciones costeras (Quintana, 2004). Las precipitaciones en esta parte del país, están fuertemente asociadas a eventos ENOS, con mayores montos en invierno entre los 30 y 35 °S en años el Niño y viceversa (Montecinos & Aceituno, 2003).

Consistente con lo anterior, los modelos proyectan una reducción en la precipitación anual de hasta un 30 % respecto al promedio actual sobre Chile central hacia fines de este siglo ((CR)2, 2015).

Según CECS (2011) estas condiciones más cálidas y la mayor frecuencia de eventos la Niña, podría ser la principal causa de balances de masa negativos y del retroceso generalizado de glaciares.

3.3 OTROS FACTORES Y LIMITACIONES

Da la impresión que la combinación de aumentos de temperaturas y declinación de precipitaciones, son las que explican algunos cambios glaciares y el ascenso de la isoterma 0 °C (Carrasco, Osorio, & Cassasa, 2008), aunque también se estima que hay otros factores secundarios afectando a los glaciares.

3.3.1 TOPOGRAFÍA

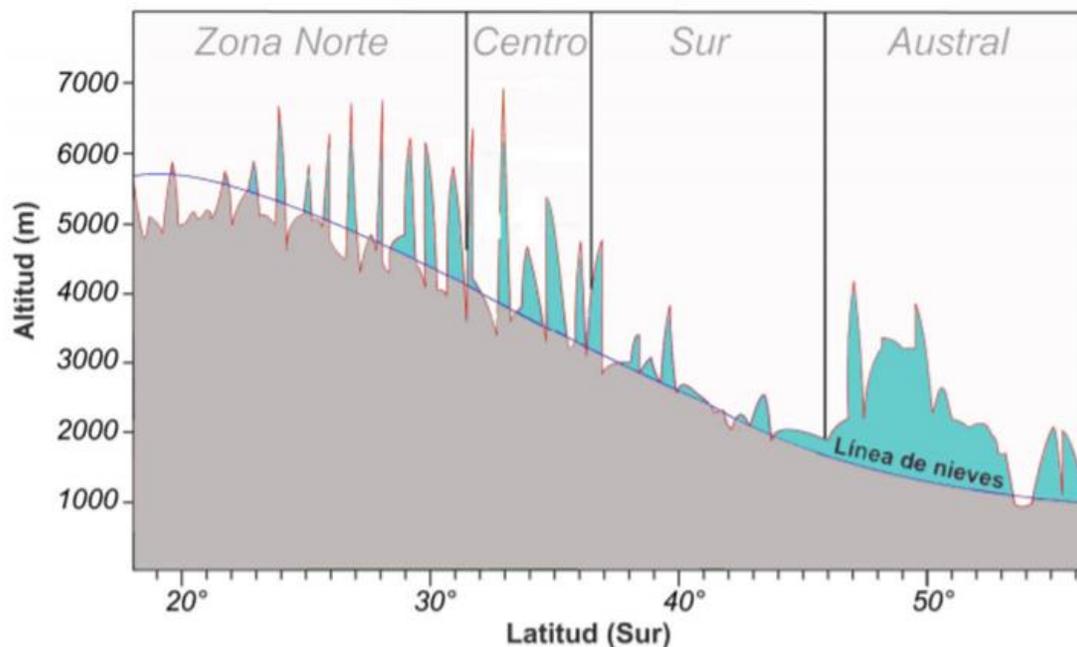
El control topográfico puede determinar las fluctuaciones de las lenguas glaciares, especialmente en aquellos con frentes desprendentes que son predominantes en Patagonia (Naruse & Skvarca, 2000). La actividad volcánica también es determinante en un gran número de glaciares, los que pueden aumentar la fusión de nieve y hielo o aislarlo dependiendo del espesor del material volcánico que se deposita sobre los glaciares (Rivera et al., 2006).

Según el Global Terrestrial Network for Glaciers (IPCC, 2007), la topografía del lecho de roca es el factor que ejerce mayor influencia en la dinámica de un glaciar y en la pendiente de su superficie, ya que de ello dependerá el flujo que presente el hielo ladera abajo.

3.3.2 ALTITUD Y LATITUD

En la siguiente imagen (figura 11) es posible observar un perfil altitudinal de la Cordillera de los Andes junto con las diferentes zonas glaciológicas detectadas según latitud. Se puede apreciar cómo la zona Norte, sumamente árida, se caracteriza por numerosas cumbres que sobrepasan la línea de las nieves, dando lugar a pequeños glaciares a gran altitud; por otro lado en la zona centro se observa la existencia de grandes cumbres, pero la línea de nieves se encuentra más cercana a los valles, dando lugar a glaciares mayores que se extienden desde las cumbres a los valles. Avanzando en la latitud, en la zona sur, la cordillera de los andes disminuye su altura, y los glaciares se reducen a algunos conos volcánicos aislados. Finalmente en la Zona Austral, el alzamiento de la cordillera sumado a la menor altitud de la línea de nieves y a las abundantes precipitaciones, dan lugar a los enormes glaciares y campos de hielo que la caracterizan (CECS, 2009).

FIGURA 11: PERFIL ALTITUDINAL DE LA CORDILLERA DE LOS ANDES A LO LARGO DE CHILE.



Se muestra en azul el perfil aproximado de la línea de nieves y los límites aproximados de la zonificación propuesta para el país. Fuente: Extraído de Estrategia Nacional de Glaciares (CECS, 2009)

3.3.3 CUALIDADES INTERNAS DEL GLACIAR

Cabe destacar que también hay factores internos de los glaciares a analizar que pueden contribuir a la desaparición más pronta de unos glaciares que otros, por ejemplo el tamaño o el área expuesta a la radiación. Se cree que los glaciares más pequeños, los glaciares de montaña y los bordes de las capas de hielo son más propensos a derretirse rápidamente (Sanz, 2012).

Respecto al área expuesta a la radiación, los glaciares de roca, cubiertos por escombros rocosos resultan más resistentes a la pérdida anual de hielo que los glaciares blancos. A modo de ejemplo, mientras que la pérdida anual de hielo en la zona de pérdida de masa de un glaciar blanco puede ser del orden de 1 a 2 metros en promedio en los Andes del centro de Chile, en los glaciares de roca esta pérdida es tan solo de 10 a 20 cm por año según investigaciones recientes de Geoestudios (2010). Así, en un escenario de general retroceso y reducción de masa de los glaciares, aquellos de roca perduraran mayor tiempo.

De hecho, para los glaciares blancos, especialistas han llegado a discutir pintar de color blanco, con cal y cemento blanco, todas las superficies superiores a los cuatro mil metros sobre el nivel del mar, esto, sustentado en “estudios de la Universidad de Berkeley de California, que revelaron que de esa forma se lograría disminuir los efectos invernadero y aumentar el hielo” (Bernex & Tejada, 2010, p. 83).

3.4 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN CHILE CENTRAL, PARA EL SIGLO XXI

Las tendencias del clima en las últimas décadas evidencian una fuerte reducción de la precipitación anual en las regiones costeras de Chile, lo que hasta ahora resulta un fenómeno más bien localizado en el litoral, no se sabe en qué medida, durante este siglo, las regiones interiores podrían comenzar a mostrar similar tendencia (Santibañez, 2016).

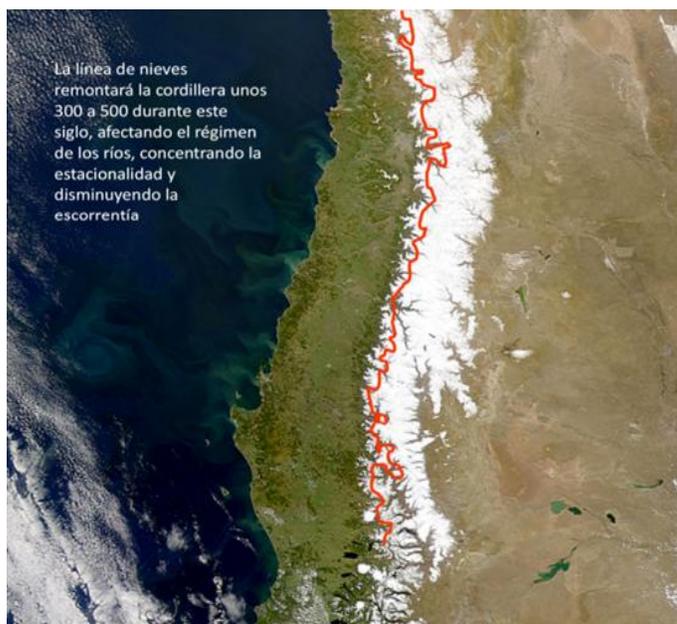
Sin embargo, en la Cordillera de Los Andes se espera que la isoterma de 0°C suba entre 300 y 500 metros, reduciendo la capacidad de la cordillera de almacenar nieve, aun cuando la precipitación no varíe, lo que reducirá los depósitos de nieve en la cordillera, haciendo que la precipitación invernal escurra rápidamente hacia el mar.

En este sentido el agua será uno de los recursos que deberá resistir a las mayores amenazas durante este siglo en Chile, debido al excesivo consumo y a la reducción de su disponibilidad debido a los cambios que está experimentando y que probablemente seguirá experimentando el régimen de lluvias.

Por ejemplo, según indica Santibañez (2016) la elevación de las líneas de las nieves en unos 500 metros entre el río Aconcagua y el Biobío, representa una pérdida de 400 a 450

millones de metros cúbicos de agua que ahora caerían en forma líquida y no sólida, por lo que dejarían de estar disponibles para la estación estival, cuando es requerida para el riego. Esto induciría una desregulación hidrológica que aumentaría la escorrentía invernal a la vez que crearía mayor riesgo de crecidas que pueden aumentar los riesgos de zonas pobladas (ver figura 12).

FIGURA 12: ALZA ESPERADA EN EL LÍMITE INFERIOR DE LAS NIEVES



Fuente: Extraído del documento “El cambio climático y los recursos hídricos de Chile” de Santibáñez, F. (2016)

LO QUE TRAERÍA EL CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA ZONA CENTRAL DE CHILE:

Según las tendencias observadas y los pronósticos que hacen los modelos mundiales del clima, los climas del futuro debieran variar según las siguientes tendencias:

- Disminución de la precipitación en zonas costeras mayormente
- Disminución del número de días de lluvia
- Aumento de la energía de la precipitación
- Aumento del contenido de vapor del aire
- Aceleración de la escorrentía por disminución de la precipitación sólida
- Aumento de la evapotranspiración y requerimientos de riego
- Posible disminución en la recarga de las napas
- Mayor arrastre de sedimentos
- Temperaturas máximas más altas en zonas interiores y más bajas en sectores costeros
- Disminución del frío invernal
- Aumento del estrés térmico de las plantas
- Aumento del viento
- Aumento de la nubosidad, especialmente en un corredor de 60 km desde la costa

Fuente: Santibáñez (2016)

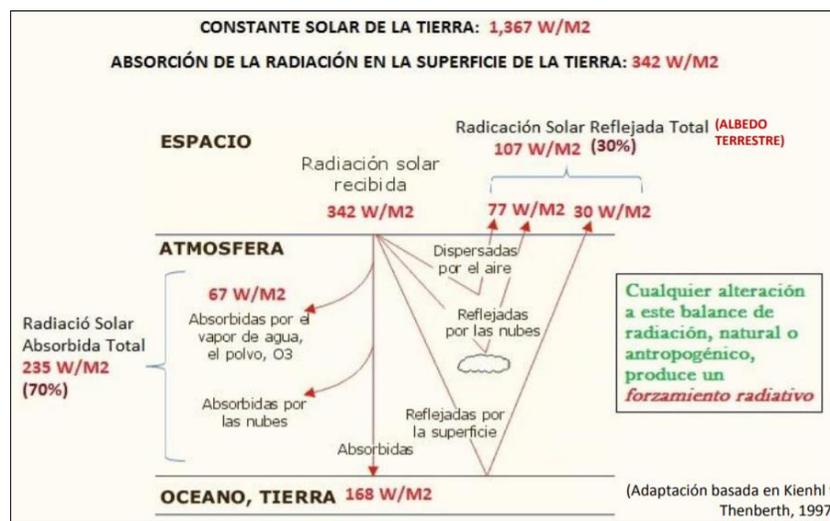
3.4.1 TRAYECTORIAS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVAS (RCP)

Los escenarios de emisiones desarrollados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) son usados para evaluar la incertidumbre de los cambios en el clima. Estos escenarios son una representación de la evolución futura de las emisiones de sustancias que podrían ser radiativamente activas (como por ejemplo los gases de efecto invernadero o aerosoles), basada en un conjunto coherente de supuestos sobre las fuerzas que las impulsan (por ejemplo el desarrollo demográfico y socioeconómico y la evolución tecnológica) y las principales relaciones entre ellos, y se sustentan sobre una base climatológica acorde permitiendo generar teorías de las posibles consecuencias del cambio generado por la actividad antropogénica (ver figura 13).

En base a estos escenarios de emisión, a partir del reporte del IPCC (2007), se desarrollaron nuevos escenarios que identificaron un marco de referencia en las emisiones, denominadas trayectorias de concentración representativas (RCP por sus siglas en inglés).

La palabra trayectoria hace hincapié en que únicamente son de interés los niveles de concentración a largo plazo, pero también indica el camino seguido a lo largo del tiempo para llegar al resultado en cuestión (Moss et. al, 2010 en IPCC, 2014). Las trayectorias de concentración representativas generalmente se proyectan hasta el año 2100, para las cuales los modelos de evaluación integrados han producido los correspondientes escenarios de emisión. Por otra parte, la palabra representativa significa que cada trayectoria de representación ofrece uno de los muchos posibles escenarios que conducirían a las características específicas de forzamiento radiativo, lo cual es medido según la cantidad media de la energía solar absorbida por metro cuadrado sobre la tierra. Esto se mide en unidades de vatios por metro cuadrado (W/m^2).

FIGURA 13: INTERCAMBIO DE ENERGÍA RADIATIVA PROMEDIO EN LA TIERRA



Fuente: Extraído de Vargas, Sánchez & Rolón (2013)

Resulta importante destacar que de los gases de efecto invernadero (GEI), el CO₂ ha causado un mayor forzamiento en las últimas décadas, alcanzando una cifra record a nivel mundial de 400 ppm, esto con base en las mediciones del Observatorio *Mauna Loa*, en *Hawai* (Shukman, 2013).

Los RCP se clasifican en cuatro trayectorias (ver tabla 4) según su forzamiento radiativo total para el año 2100 que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m²:

TABLA 4: TRAYECTORIAS DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVAS (RCP)

RCP	Forzamiento radiativo	Concentración equivalente de CO ₂ al 2100	Tendencia de forzamiento radiativo al 2100
RCP 8.5	8.5 W/m ²	936 ppm	Creciente
RCP 6.0	6.0 W/m ²	670 ppm	Estable
RCP 4.5	4.5 W/m ²	538 ppm	Estable
RCP 2.6	2.6 W/m ²	421 ppm	Decreciente

Fuente: Tomado de la guía resumida del Quinto informe de Evaluación del IPCC. WGI. "Cambio Climático: Bases Físicas" (2013).

Los RCP a medida que se va incrementando el riesgo climático y disminuyendo los esfuerzos de mitigación pasan desde el 2.6, 4.5, 6.0 al 8.5.

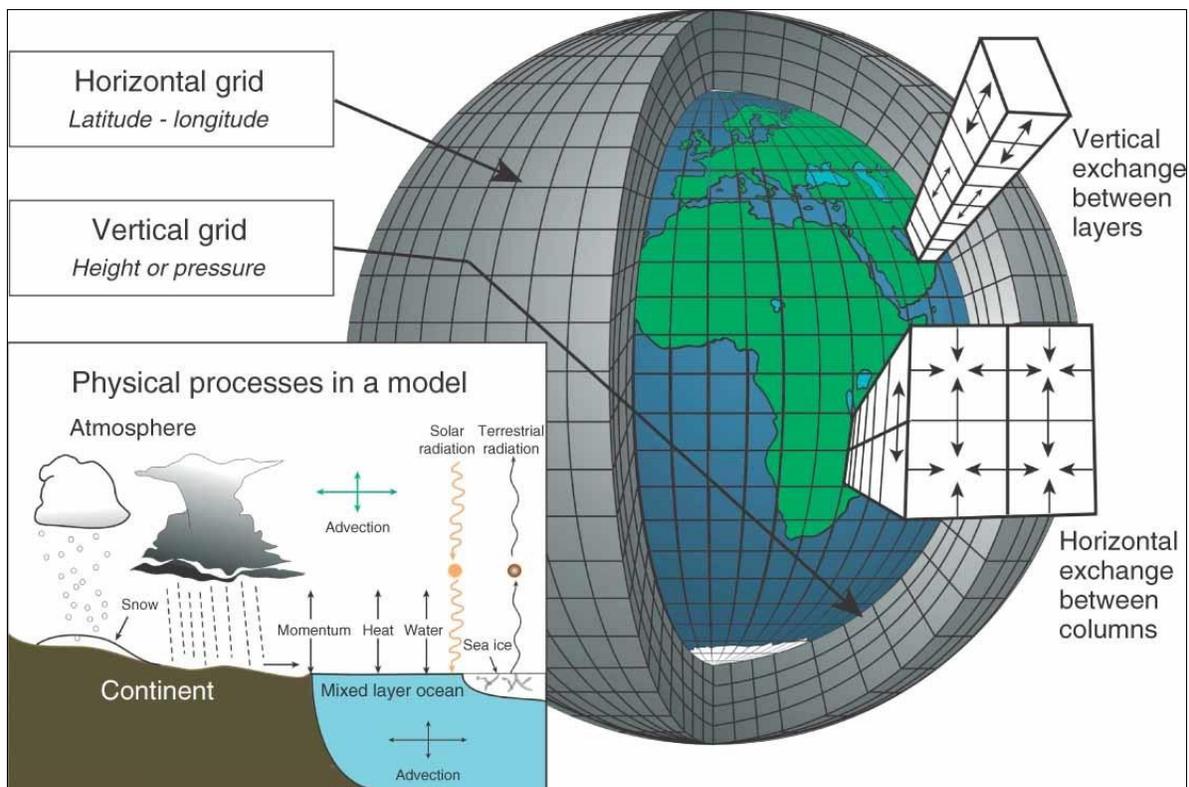
El RCP 2.6 es la trayectoria en la que el forzamiento radiativo alcanza el valor máximo a aproximadamente 3 W/m² antes de 2100 y posteriormente disminuye (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto que sean constantes las emisiones después de 2100). Esta vía de concentración implica un calentamiento de no más de 2 grados centígrados a fin de siglo, requiriendo políticas drásticas y compromiso de todas las naciones. Por otra parte, las RCP 4.5 y RCP 6.0 son trayectorias de estabilización intermedias en las cuales el forzamiento radiativo se estabiliza a aproximadamente 4.5 W/m² y 6 W/m² después de 2100 (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto que sean constantes las concentraciones después de 2150) y finalmente el RCP 8.5 es la trayectoria más alta para la cual el forzamiento radiativo alcanza valores superiores a 8.5 W/m² en el 2100 y sigue aumentando durante un lapso de tiempo (la correspondiente trayectoria de concentración ampliada en el supuesto que sean constantes las emisiones después de 2100 y sean constantes las concentraciones después de 2250).

Por último, cabe mencionar que en todos los escenarios, las concentraciones de CO₂ se proyectan mayores en la atmósfera en el 2100, que en la actualidad, como consecuencia de las emisiones acumuladas durante el siglo XXI. Unas emisiones iguales o superiores a las actuales inducirán cambios en todos los componentes del sistema climático, algunos de ellos sin precedentes en cientos o miles de años. La limitación del cambio climático requerirá reducciones sustanciales y sostenidas de las emisiones de CO₂.

3.4.2 MODELO CLIMÁTICO GLOBAL WORLDCLIM 1.4, VERSIÓN HADLEY GLOBAL ENVIRONMENT MODEL 2 – EARTH SYSTEM (HADGEM2ES)

WorldClim 1.4, es una base de datos que reúne conjuntos de capas de clima a nivel mundial, y que se pueden utilizar para mapeo y modelado espacial (ver figura 14). Contiene datos de distintas variables climáticas (datos para la temperatura mínima, media y máxima, datos de precipitación y variables bioclimáticas) en cuadrícula, almacenada en formato GeoTiff, para el periodo 1960 – 1990 , así como proyecciones de temperatura y precipitación del Quinto Informe de Evaluación del IPCC, que utiliza varios modelos de circulación general (GCM) para cuatro vías de concentración representativas (RCP) y simulaciones de temperatura y precipitación basadas en GCM para el Holoceno Medio (hace aproximadamente 6000 años), el Último Máximo Glacial (hace aproximadamente 22,000 años) y el Último Interglacial (hace 120,000 - 140,000 años).

FIGURA 14: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA ESTRUCTURA DE CUADRÍCULA CARTESIANA UTILIZADA EN GCM DE DIFERENCIAS FINITAS



Fuente: Gráfico de Courtney Ritz y Trevor Burnham, en Edwards (2010)

Específicamente, y como se observa en la tabla 5, los datos de la versión *Hadley Global Environment Model 2 – Earth System* (HadGEM2-ES), comprenden un GCM atmosférico con resolución horizontal N96 (1.25° latitud x 1.875° longitud) y L38 (38 niveles verticales)

y un paso de tiempo de 30 minutos, y un GCM oceánico con una resolución horizontal de 1° de latitud x 1° de longitud (que aumenta a 1/3° en el ecuador), con 40 niveles verticales y un paso de tiempo de 1 hora (NERC, 2013). Los componentes del sistema atmósfera y océano están completamente acoplados, incluyendo vegetación dinámica, biología oceánica y química atmosférica (Caesar, Palin, & Liddicoat, 2013).

TABLA 5: RESOLUCIÓN DEL MODELO HADGEM2-ES

Modelo	Rejilla atmosférica		Rejilla Oceánica	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud
HadGEM2-ES	1.25	1.875	0.3396 (Ecuador), 1 (polos)	1

Fuente: Elaboración propia, 2019.

La conformación de la imagen a analizar está en formato ráster, es decir, configurada por un conjunto de puntos (píxeles) que representan un valor, y posteriormente, guardadas en formato TIF. Al respecto, los datos están disponibles en diferentes resoluciones espaciales (expresados en minutos o segundos de un grado de longitud y latitud): 10 minutos, 5 minutos, 2,5 minutos y 30 segundos.

CAPITULO 4: METODOLOGÍA

La siguiente metodología se ha generado con base en la información extraída del libro Metodología de la investigación, cuarta edición, publicada por Sampieri, Fernández y Baptista (2006) y Generalidades sobre Metodología de la Investigación de Cortés e Iglesias (2004)

El presente estudio, plantea alcances de tipo correlacional, ya que tiene como propósito evaluar a futuro la relación existente entre diversas variables que pueden afectar el derretimiento glaciar en la zona central. Para ello se utiliza un enfoque cuantitativo, ya que se usa la recolección de datos como centro del proceso de investigación, con base en las mediciones numéricas y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y llegar a responder la pregunta de investigación (Sampieri, Fernández, & Baptista, 2006).

4.1 SISTEMATIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS GLACIARES EN ESTUDIO Y SUS VARIACIONES AREALES

Para la concreción del objetivo n°1, es necesario desarrollar el enfoque cuantitativo, mediante la extracción y recopilación de datos climáticos actuales de GCM WorldClim 1.4 (específicamente los datos de la versión HadGEM2-ES) y mediante revisión bibliográfica de documentos y shp de la DGA (ver tabla 6). Se pretende organizar la información para los 15 glaciares en estudio, mediante estadística descriptiva, describiendo las características fundamentales de los glaciares haciendo uso de tablas de datos en Microsoft Excel, con su posterior análisis.

De las 19 variables bioclimáticas con las que consta el GCM se utilizan 2 para el análisis de datos, las que representan las tendencias anuales: BIO1 y BIO12, correspondiente a la temperatura media anual (en grados Celsius) y precipitación anual (en milímetros), respectivamente. Ambas analizadas según sus mínimas, máximas y media aritmética en el actual escenario (a partir de datos observados entre los años 1960 – 1990, que conforman una línea base).

En lo que respecta a los datos extraídos del archivo shapefile, que contiene información territorial de glaciares de la DGA (2015), corresponden a la altura mínima y máxima (en metros), la orientación de los glaciares (en grados), la pendiente (en grados) y el espesor medio (en metros). Para los glaciares que cuentan con más de un polígono se pondera la orientación, la pendiente y el espesor respecto del área que abarca cada polígono.

Por último, del informe “Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas” de la DGA (2011), se extraen datos del área de los glaciares (en kilómetros cuadrados) y la variación areal (en kilómetro cuadrado y en porcentaje).

TABLA 6: VARIABLES UTILIZADAS SEGÚN FUENTE DE EXTRACCIÓN DE DATOS

Variables bioclimáticas de WorldClim 1.4 (datos observados entre 1960 – 1990)	Shp de glaciares de la DGA (2015)	Informe de la DGA (2011)
BIO1 – T° medial anual (°C) BIO12 – Precipitación anual (pp)	Altura (m) Orientación (°) Pendiente (°) Espesor (m)	Área (km ²) Variación areal (km ² y %)

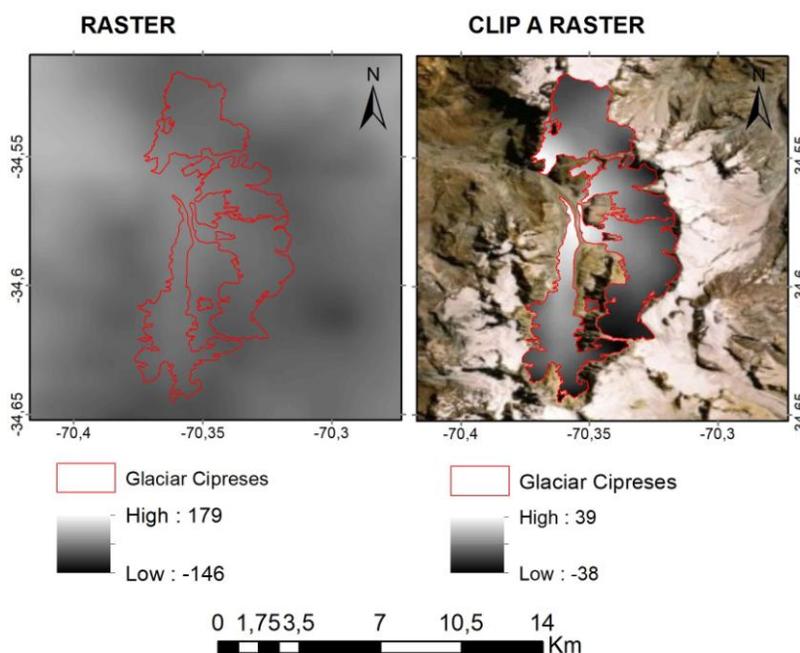
Fuente: Elaboración propia (2019).

4.1.1 OBTENCIÓN DE DATOS DE IMÁGENES RASTER

Para extraer los datos de las mínimas, máximas y media aritmética de las variables bioclimáticas (BIO1 y BIO12) se trabaja en ArcGis con las imágenes raster descargadas de WorldClim, y el shape de glaciares descargado de la DGA.

En primer lugar se reduce la escala del raster (se explica en el punto 4.2.2) y se tratan las imágenes con la herramienta de geoprocésamiento Clip, la cual permite cortar los glaciares en estudio y así delimitar los datos del raster a cada glaciar, con el fin de extraer solo la información que contienen los glaciares (ver figura 15).

FIGURA 15: RECORTE DE VARIABLE BIO1 A GLACIAR CIPRESES



Fuente: Elaboración propia (2019).

Como se observa en la figura 15, se obtienen los valores mínimos y máximos de cada glaciar, pero no así el promedio (ya sea de temperatura o precipitación), el cual es útil para comprender la tipología del glaciar, por lo que posteriormente se exportan los datos de la tabla de atributos a excel para procesar los valores según la cantidad de pixeles que se indiquen (ver tabla 7 y 8).

Al respecto, la siguiente tabla indica la fórmula para su obtención:

TABLA 7: CÁLCULOS PARA OBTENER LOS VALORES PROMEDIO DE LAS VARIABLES PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA

<ul style="list-style-type: none"> ▪ VALUE: Valor de temperatura o precipitación según la variable que corresponda (BIO1 o BIO12) ▪ COUNT: Cantidad de pixeles en la imagen raster con el valor de la variable ▪ Suma count: Corresponde al total de pixeles de cada glaciar en estudio y se obtiene sumando todos los datos COUNT ▪ %: Es el porcentaje de pixeles con el valor de la variable adscrita. Se expresa: $\frac{COUNT}{SUMA\ COUNT} * 100$ ▪ Suma%: suma de todos los porcentajes (%), el cual debe ser igual a 100 ▪ Pond: Corresponde al valor ponderado según el porcentaje de pixeles. Se expresa: $\frac{PORCENTAJE\ (\%)}{100} * VALUE$ ▪ Promedio: suma de todos los valores ponderados
--

Fuente: Elaboración propia (2019)

A continuación un ejemplo de los datos procesados del glaciar Monos de Agua:

TABLA 8: PROCESAMIENTO DE VALOR PROMEDIO DE PRECIPITACIÓN SEGÚN LÍNEA BASE
(EN ESCALA 1:1) – GLACIAR MONOS DE AGUA

VALUE	COUNT	%	POND
397	16	1,651	6,555
398	24	2,477	9,858
399	28	2,890	11,529
400	21	2,167	8,669
401	20	2,064	8,277
402	25	2,580	10,372
403	20	2,064	8,318
404	25	2,580	10,423
405	24	2,477	10,031
406	21	2,167	8,799
407	24	2,477	10,080
408	20	2,064	8,421
409	21	2,167	8,864
410	18	1,858	7,616
411	16	1,651	6,786
412	29	2,993	12,330
413	29	2,993	12,360
414	29	2,993	12,390
415	43	4,438	18,416
416	55	5,676	23,612
417	45	4,644	19,365
418	39	4,025	16,824
419	39	4,025	16,864
420	51	5,263	22,105
421	52	5,366	22,592
422	50	5,160	21,775
423	45	4,644	19,644
424	43	4,438	18,815
425	40	4,128	17,544
426	43	4,438	18,904
427	14	1,445	6,169

	SUMA COUNT	SUMA %	PROMEDIO
TOTAL	969	100	414

Fuente: Elaboración propia (2019), a partir del datos obtenidos del recorte de imagen raster BIO1, extraída de WorldClim 1.4

4.2 ESTIMACIÓN DE LAS TRAYECTORIAS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS EN LOS GLACIARES

Para el objetivo n°2 se utiliza un enfoque cuantitativo, haciendo uso de las 2 variables bioclimáticas nombradas anteriormente: BIO1 y BIO12, correspondiente a la temperatura media anual (en °C con un factor de escala de 10) y precipitación anual (en mm con un factor de escala igual a 1), respectivamente.

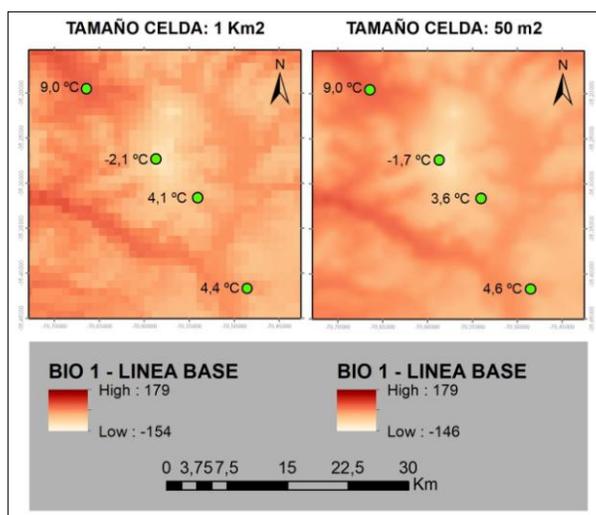
Estas variables se cartografían tanto la línea base como las vías de concentración representativas RCP 2.6 y RCP 8.5, para un futuro medio, correspondiente al año 2050, por lo que se generan mapas, gráficos y tablas para su análisis.

4.2.1 DOWNSCALING O REDUCCIÓN DE ESCALA DE IMÁGENES SATELITALES

La técnica de *downscaling* es un procedimiento que consiste en proyectar de forma precisa la información disponible a gran escala sobre la escala regional (von Storch, Zorita, & Cubasch, 1993), trabajando con información espacial proveniente de los GCM, permitiendo la realización de estudios a mayor detalle (HOAR & NYCHKA, 2008; ZIMMERMANN, 2010) y conectando la brecha existencial entre el potencial intrínseco de los GCM.

Como ya se explicó anteriormente, los datos vienen disponibles en diferentes resoluciones espaciales. Para el presente proyecto investigativo se utilizaron los datos con resolución espacial de 30 segundos, equivalentes a 0,93 km x 0,93 km = 0,86 km² en la línea del ecuador (1km² aproximadamente en la línea del Ecuador) ya que son los que presentan mejor resolución espacial.

FIGURA 16: DETALLE DE REDUCCIÓN DE ESCALA



Fuente: Elaboración propia (2019)

Para obtener aún mejor resolución espacial, se procesan las imágenes raster en ArcGIS, mediante la técnica de “interpolación bilinear”, la cual determina el nuevo valor de cada pixel basándose en el promedio de distancia ponderada de los cuatro pixeles circundantes, siendo útil para los datos continuos. En consecuencia, la resolución a utilizar es de 50 x 50 metros aproximados (ver figura 16).

4.2.2 REPRESENTACIÓN DE VARIABLES BIO1 Y BIO12

Para representar y analizar la variación de temperatura y precipitación se agrupan en nueve intervalos de valores entre las mínimas y las máximas y se representan con las paletas de colores extraídas de *Colorbrewer 2.0*.

Por último, se extraen las isotermas -5, 0 y 5 °C de la variable bioclimática BIO1, tanto para la línea base como para los escenarios futuros, creando isolíneas con la herramienta *contour*, en ArcGIS.

Estos datos son procesados y modelados mediante estadística inferencial, es decir se pretende poder hacer predicciones teniendo en cuenta el grado de incertidumbre, esto con Sistema de Información Geográfica (SIG), particularmente con el software ArcGIS 10.

Además se utilizan los promedios de temperatura y precipitación calculados anteriormente para la línea base, y se calculan los promedios para las vías de concentración representativas (RCP 2.6 y RCP 8.5).

Finalmente en Microsoft Excel se generan gráficos polares para mayor comprensión de la información generada, los que son analizados posteriormente

4.3 ANÁLISIS DE RELACIÓN ENTRE LAS PROYECCIONES DE CAMBIOS CLIMÁTICOS Y LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS GLACIARES EN ESTUDIO

Posterior a la clasificación de los glaciares y la obtención de datos de WorldClim 1.4, se evalúa la relación existente entre las variables que intervienen en el estudio. Las variables que se utilizan en el presente proyecto son múltiples, siendo principalmente temperatura y precipitación, las cuales se definen como variables intervalares continuas, por lo que su información se proyecta calculando la media aritmética y mediante este dato se busca conocer el nivel de relación entre estas variables y otras independientes.

4.3.1 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON

El método específico que se aplica en el último objetivo investigativo es el coeficiente de correlación de Pearson cuya función es determinar si existe una relación lineal entre dos variables a nivel intervalar y que esta relación no sea debida al azar (que la relación sea estadísticamente significativa). Aunque el hecho que dos variables sean incorreladas significa que entre ellas no hay ninguna relación de dependencia lineal, pero puede haber otro tipo de dependencia (Vargas S. , 1995).

Los valores de la correlación de Pearson van desde -1 hasta 1, siendo los valores extremos los que indican mayor correlación entre variables, y siendo el 0 el punto que indica la no existencia de correlación. El signo positivo o negativo del coeficiente indica si la relación es directa (positivo) o inversa (negativo). La correlación no implica causalidad o dependencia.

El coeficiente de correlación de Pearson viene definido por la siguiente expresión:

$$r_{xy} = \frac{\sum Z_X Z_Y}{N}$$

Esto significa que el coeficiente de correlación de Pearson hace referencia a la media de los productos cruzados de las puntuaciones estandarizadas de X y de Y. Esta fórmula reúne algunas propiedades que la hacen preferible a otras. Al operar con puntuaciones estandarizadas es un índice libre de escala de medida. Por otro lado, su valor oscila, como ya se ha indicado, en términos absolutos, entre 0 y 1

En efecto:

- 1) Si $r=0$, la correlación es nula, y las rectas son paralelas a cada uno de los ejes y perpendiculares entre sí
- 2) El signo de r señala la dirección de la correlación
- 3) El valor absoluto de r señala la intensidad de la relación $|r|=1$ indica una correlación perfecta. Un valor absoluto de r grande (próximo a 1) indica una fuerte correlación
- 4) El mayor valor de r es 1, en cuyo caso la varianza residual es cero, por lo que todos los puntos de la nube están sobre la recta. Se trata de correlación positiva perfecta
- 5) El menor valor de r es -1, en cuyo caso la varianza residual es también nula, pero ahora las pendientes son negativas. Se trata de correlación perfecta, pero negativa

A continuación se presenta un esquema que sintetiza la metodología aplicada en los 3 objetivos:

TABLA 9: ESQUEMA METODOLÓGICO APLICADO PARA VER PROYECCIONES FUTURAS DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS QUE PUEDEN AFECTAR A LOS GLACIARES EN ESTUDIO, A MEDIADOS DEL SIGLO XXI

Objetivos	Fuentes	Herramientas	Métodos	Producto
Nº1: Describir y sistematizar las características de los glaciares en estudio y sus variaciones areales	Secundarias: Revisión de sitios web oficiales Datos climáticos actuales extraídos del modelo climático global (GCM) WorldClim 1.4.	Microsoft office Excel ArcGIS 10	Revisión bibliográfica Organización de la información mediante estadística descriptiva	Tablas de datos Gráficos
Nº2: Estimar las trayectorias de cambios climáticos y sus efectos en los glaciares	Datos climáticos actuales y futuros, extraídos del modelo climático global (GCM) WorldClim 1.4	Microsoft office Excel ArcGIS 10	Manipulación y análisis de datos mediante procesamiento de imágenes raster y estadística inferencial	Tablas de datos Gráficos Cartografías
Nº3: Analizar la relación entre las proyecciones de cambios climáticos y las características de los glaciares en estudio	Datos recopilados en objetivos 1 y 2	Microsoft office Excel	Manipulación y análisis de datos mediante estadística multivariable	Tabla de Datos

Fuente: Elaboración propia, 2019.

CAPITULO 5: RESULTADOS

5.1 RESULTADO 1: SISTEMATIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS GLACIARES EN ESTUDIO

A continuación, de norte a sur, se presentan algunas tablas con ciertas características de los glaciares en estudio, que pueden ser cuantificables, y se realiza su respectivo análisis:

TABLA 10: ALTURA Y ORIENTACIÓN DE GLACIARES EN ESTUDIO

NOMBRE GLACIARES	Altura		Orientación	Espesor	Pendiente
	altura min (msnm)	altura máx (msnm)	orientación (°)	Espesor medio ponderado (m)	Pendiente media ponderada (°)
Monos de Agua	4014	5135	180	39,557	19,424
Juncal Norte	2893	5890	0	63,371	28,296
Juncal Sur	3773	5648	135	83,781	17,011
Olivares Gama	3618	4973	180	69,513	15,744
Olivares Beta	3892	4893	135	58,815	13,304
El Rincón	3806	4633	135	24,583	23,478
La Paloma	3704	4887	202,5	27,102	31,522
Olivares Alfa	4133	5074	45	51,132	15,599
Vn. Tupungatito	3517	5821	292,5	53,326	17,931
Marmolejo	3806	6021	292,5	55,323	20,138
San José	3139	5392	202,5	46,105	23,091
Cipreses	2700	4426	315	60,552	16,640
Universidad	2426	4934	133,5	86,626	21,083
Vn. Peteroa	3242	3724	292,5	32,399	16,294
El Azufre	3045	3652	202,5	32,033	15,735

Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos de shp de glaciares de la DGA, 2015.

La tabla 10 presenta la altitud mínima y máxima de cada glaciar, su orientación predominante, el espesor y la pendiente media ponderada. En primer lugar, de los datos de altura máxima se puede observar 4 glaciares que cuentan con alturas de más de 5800 msnm, en orden de mayor a menor altura están: Glaciar Marmolejo, Juncal Norte, Volcán Tupungatito, Glaciar Juncal Sur. Por otro lado, los glaciares que registran menores alturas (inferiores a 2700 msnm) son Universidad, Cipreses y Juncal Norte, de menor a mayor altitud respectivamente. Entonces, se destaca el glaciar Juncal Norte, el cual registra tanto

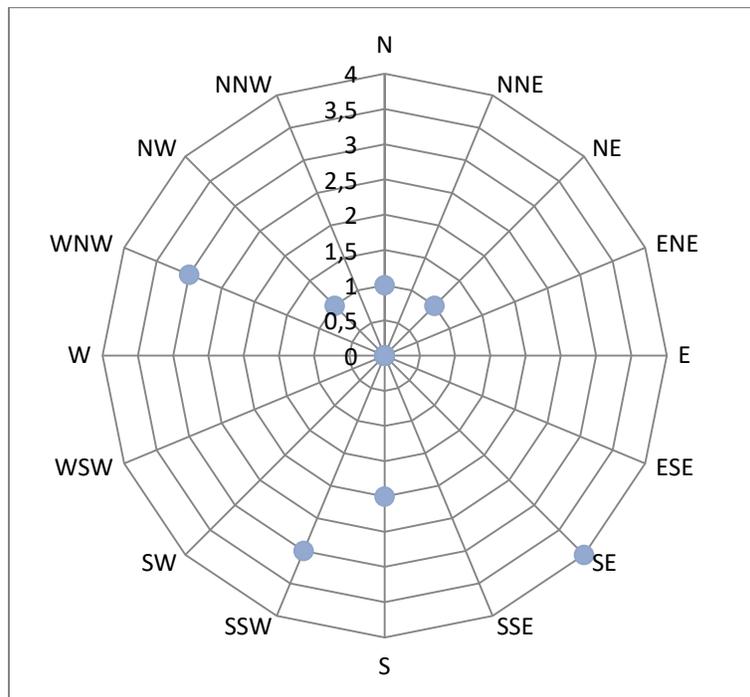
las alturas mínimas como máximas (entre 2893 y 5890 msnm) dentro de los glaciares estudiados.

Se puede explicar esta diferencia de altura al observar que cuenta con una de las más altas pendientes (inclinación de 28 ° aproximado), abarcando distintas altitudes. Otro glaciar con pendiente pronunciada es el La Paloma (31°), pero su diferencia de altitud no varía demasiado, por lo que se deduce que este glaciar es más pequeño que el Juncal Norte.

Es posible observar la orientación de laderas predominante de cada glaciar, considerando: 0 ° como orientación norte, 90 ° como orientación este, 180 ° como orientación sur y 270 ° como orientación oeste. Los resultados arrojan que hay 4 glaciares que están mayormente orientados hacia el SE (26,6 %), luego 3 hacia el SSW y al WNW en misma proporción (20 %) y 2 al S (13,3 %), por último hay 3 glaciares que se orientan mayormente al norte (N, NE y NW). En definitiva, son más los glaciares con preferencia de orientación hacia el S (ver figuran 17).

Los espesores varían de 86 m a 24 m, observándose los glaciares Juncal Sur, Universidad y Olivares Gama con los mayores espesores (sobre 83, 86 y 69 m respectivamente) y los glaciares El Rincón (24 m), La Paloma (27 m), Volcán Peteroa (32 m) y El Azufre (32 m) con los menores espesores.

FIGURA 17: PREFERENCIA DE ORIENTACIÓN DE GLACIARES EN ESTUDIO



Fuente: Elaboración propia

A continuación se observa la variación areal cuantificada de 3 formas en distintos periodos para cada glaciar:

- 1.- Según la variación entre el área inicial y el área final registrada
- 2.- Según la tasa de variación
- 3.- Según la variación porcentual

TABLA 11: VARIACIÓN AREAL DE GLACIARES EN ESTUDIO

NOMBRE GLACIARES	área inicial (km ²)	área final (km ²)	V. areal (km ²)	Tasa de V. areal (km ² a-1)	Variación (%)	periodo
Monos de Agua	2,51	1,96	-0,55	-0,02	-22	1989-2011
Juncal Norte	7,37	7,22	-0,15	-0,003	-2	1955-2011
Juncal Sur	33,5	21,98	-11,52	-0,2	-34	1955-2011
Olivares Gama	15,76	12,52	-3,24	-0,06	-20	1955-2011
Olivares Beta	13,69	8,56	-5,13	-0,09	-37	1955-2011
El Rincón	0,7	0,8	0,1	0,005	14	1989-2007
La Paloma	2,47	2,17	-0,3	-0,02	-12	1989-2007
Olivares Alfa	8,92	6,1	-2,82	-0,11	-32	1986-2011
Vn. Tupungatito	30,17	26,4	-3,77	-0,16	-13	1986-2010
Marmolejo	24,94	14,65	-10,29	-0,43	-41	1986-2010
San José	9,23	8	-1,23	-0,05	-13	1986-2010
Cipreses	38,81	38,1	-0,71	-0,01	-2	1842-2007
Universidad	31,66	29,67	-1,99	-0,03	-6	1945-2011
Vn. Peteroa	11,29	3,71	-7,58	-0,29	-67	1985-2011
El Azufre	8,83	5,21	-3,62	-0,14	-41	1985-2011

Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos de shp de glaciares de la DGA, 2015.

Los datos de la tabla 11 muestran que el glaciar El Rincón resulta ser el único glaciar que aumenta su área entre los años 1989 y 2007, experimentando un aumento areal de 0,1 km², con una variación anual y variación porcentual positiva (avance areal de 0,005 km² por año y aumentó 14 % su área respectivamente). Sin embargo el resto de los glaciares en estudio muestran un retroceso areal.

El que experimentó mayor pérdida de área respecto de su inicio fue el glaciar Juncal Sur, disminuyendo su área en 11,52 km² entre los años 1955 y 2011, con una tasa de -0,2 km² por año, equivalente a un 34 % de pérdida total de área.

El glaciar que también perdió varios kilómetros de su área fue el glaciar Marmolejo, disminuyendo 10,29 km² de área entre los años 1986 y 2010, con una tasa de -0,43 km² por año (la variación anual más alta registrada entre los glaciares en estudio), equivalente a un 41 % de pérdida total de área.

También son destacables los glaciares Volcán Peteroa y El Azufre, ya que entre los años 1985 y 2011, ambos sufrieron una pérdida total de área de 67 % y 41 % respectivamente, y anualmente presentan una tasa de variación de -0,29 y -0,14 km² por año, también en el mismo orden.

Por otra parte, se observa en la Tabla 12 la temperatura media anual de los glaciares, considerando los pixeles con registros más bajos, los pixeles con registros más altos y la temperatura media anual promediada de cada glaciar.

TABLA 12: TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LOS GLACIARES, SEGÚN LÍNEA BASE

NOMBRE GLACIARES	BIO1 (T ^o media anual)		
	LBmin	LBmax	LBprom
Monos de Agua	-6,60	-3,00	-5,15
Juncal Norte	-9,60	4,30	-5,43
Juncal Sur	-8,80	-1,70	-4,48
Olivares Gama	-6,20	-0,40	-4,56
Olivares Beta	-5,90	-1,70	-4,86
El Rincón	-5,20	-1,60	-3,12
La Paloma	-5,90	-1,60	-4,59
Olivares Alfa	-7,40	-3,30	-5,19
Vn. Tupungatito	-11,00	0,40	-8,11
Marmolejo	-11,50	-1,90	-7,22
San José	-9,20	2,70	-3,83
Cipreses	-3,80	3,90	-0,80
Universidad	-5,50	5,70	-0,55
Vn. Peteroa	-1,10	2,60	0,60
El Azufre	-0,80	2,10	0,39

Fuente: Elaboración propia en base a datos extraídos de variables bioclimáticas de WorldClim 1.4

En primer lugar se destacan los glaciares Volcán Peteroa (0.60 °C) y El Azufre (0,39 °C) ya que al analizarlos en su totalidad, presentan temperaturas medias anuales que promedian sobre los 0 °C, por lo que son glaciares más cálidos que el resto de los glaciares analizados y un poco menos cálidos son los glaciares Universidad, Cipreses y Pirámide, que bordean entre el -1 y 0 °C en promedio. En segundo lugar se observa que los glaciares Volcán Tupungatito (-8,11 °C) y Marmolejo (-7,22 °C) promedian las temperaturas más bajas.

Sin embargo si analizamos los glaciares según sus temperaturas máximas anuales registradas se observa que 7 de 15 glaciares alcanzan temperaturas superiores a 0°C. Las temperaturas medias anuales máximas (sobre los 4 °C) se registran en los glaciares Universidad (5,7 °C) y Juncal norte (4,3 °C).

Por otra parte las temperaturas medias anuales mínimas se registran para los glaciares Marmolejo (-11,5 °C), Volcán Tupungatito (-11 °C), Juncal Norte (-9,6 °C) y San José (-9,2 °C)

Cabe destacar el glaciar Juncal Norte, ya que es el glaciar que presenta mayor amplitud de temperaturas al analizarlo por pixel, pero al analizarlo en su totalidad la temperatura media resulta relativamente normal respecto del resto de los glaciares (-5,4 °C).

Finalmente, se observa en la Tabla 13 la precipitación anual y sus valores mínimos, máximos y el promedio según corresponda para cada glaciar.

TABLA 13: PRECIPITACIÓN ANUAL DE LOS GLACIARES, SEGÚN LÍNEA BASE

NOMBRE GLACIARES	BIO12 (pp anual)		
	LBmin	LBmax	LBprom
Monos de Agua	397,0	427,0	414,3
Juncal Norte	386,0	471,0	434,5
Juncal Sur	417,0	463,0	428,9
Olivares Gama	424,0	449,0	436,9
Olivares Beta	428,0	452,0	442,9
El Rincón	444,0	457,0	448,0
La Paloma	444,0	461,0	453,5
Olivares Alfa	439,0	473,0	454,1
Vn. Tupungatito	440,0	512,0	479,4
Marmolejo	488,0	543,0	505,2
San José	496,0	525,0	502,4
Cipreses	623,0	759,0	655,4
Universidad	628,0	791,0	668,5
Vn. Peteroa	718,0	764,0	738,5
El Azufre	721,0	755,0	732,4

Fuente: Elaboración propia en base a datos extraídos de variables bioclimáticas de WorldClim 1.4

En lo que respecta a la precipitación, se observa un menor recibimiento de agua en los glaciares localizados en el norte y mayor cantidad de agua hacia el sur. Específicamente los glaciares que reciben menor aporte de agua en promedio son los glaciares Monos de Agua (414 mm), Juncal sur (428 mm) y Juncal Norte (434 mm). Por el contrario los glaciares que reciben mayor aporte hídrico en promedio son Volcán Peteroa, el Azufre y Universidad (738 mm, 732 mm y 668 mm respectivamente)

En último lugar cabe destacar que las precipitaciones mínimas y máximas registradas para los glaciares están en concordancia con los promedios, es decir que se observan las precipitaciones mínimas registradas al norte y máximas al sur.

5.2 RESULTADO 2: TRAYECTORIAS DE CAMBIOS CLIMÁTICOS Y SUS EFECTOS EN LOS GLACIARES

5.2.1 TEMPERATURA MEDIA ANUAL – BIO1

A continuación, en la tabla 14 se presentan de norte a sur, los datos de temperatura media anual de los glaciares en estudio, para 3 escenarios: actual (periodo de referencia de 1961 a 2000), futuro mediano optimista (RCP 2.6 – año 2050) y futuro mediano pesimista (RCP 8.5 – año 2050), considerando los pixeles con registros más bajos, los pixeles con registros más altos y la temperatura media anual promediada de cada glaciar.

TABLA 14: DATOS DE TEMPERATURA MEDIA ANUAL, EN EL ESCENARIO ACTUAL, FUTURO MEDIO OPTIMISTA Y FUTURO MEDIO PESIMISTA

NOMBRE GLACIARES	BIO1(Tº media anual)								
	LB			RCP 2.6			RCP 8.5		
	LB min	Lb max	LB	2.6 min	2.6 max	2.6	8.5 min	8.5 max	8.5
Monos de Agua	-6,60	-3,00	-5,15	-5,10	-1,60	-3,75	-4,00	-0,60	-2,63
Juncal Norte	-9,60	4,30	-5,43	-8,20	5,80	-4,02	-7,10	6,80	-2,95
Juncal Sur	-8,80	-1,70	-4,48	-7,40	-0,30	-3,08	-6,30	0,80	-2,01
Olivares Gama	-6,20	-0,40	-4,56	-4,70	1,00	-3,16	-3,70	2,00	-2,11
Olivares Beta	-5,90	-1,70	-4,86	-4,50	-0,20	-3,49	-3,50	0,80	-2,46
El Rincón	-5,20	-1,60	-3,12	-3,80	-0,30	-1,78	-2,80	0,70	-0,76
La Paloma	-5,90	-1,60	-4,59	-4,50	-0,30	-3,24	-3,50	0,70	-2,21
Olivares Alfa	-7,40	-3,30	-5,19	-6,10	-1,90	-3,82	-5,10	-0,80	-2,78
Vn. Tupungatito	-11,00	0,40	-8,11	-9,60	1,90	-6,69	-8,50	2,90	-5,60
Marmolejo	-11,50	-1,90	-7,22	-10,10	-0,60	-5,83	-9,00	0,40	-4,75
San Jose	-9,20	2,70	-3,83	-7,80	4,20	-2,46	-6,70	5,20	-1,40
Cipreses	-3,80	3,90	-0,80	-2,60	5,20	0,49	-1,60	6,10	1,49
Universidad	-5,50	5,70	-0,55	-4,20	7,00	0,75	-3,20	8,00	1,76
Vn. Peteroa	-1,10	2,60	0,60	0,20	3,90	1,87	1,20	4,90	2,88
El Azufre	-0,80	2,10	0,39	0,50	3,30	1,67	1,50	4,40	2,71

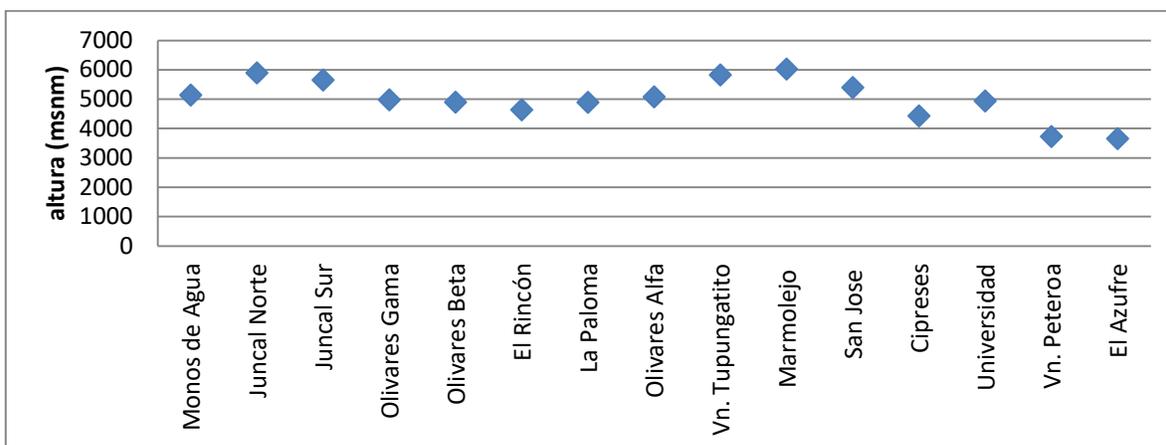
Fuente: Elaboración propia en base a datos extraídos de WorldClim 1.4 (2019)

Al respecto, se observa en primer lugar un aumento paulatino de la temperatura para todos los glaciares en los dos escenarios propuestos, respecto de la línea base (escenario actual), siendo mayores las temperaturas en el escenario RCP 8.5. En otras palabras, la proyección de su evolución, según el CGM hacia el escenario optimista, indica un aumento de 1,2 °C a 1,4 °C y hacia el escenario pesimista un aumento de 2,2 °C a 2,5 °C.

También se observa una distribución de temperaturas diferenciadas de norte a sur, localizándose hacia el norte temperaturas promedio más bajas que en el sur (5º de

diferencia aproximados), aunque hay algunas excepciones. Esto puede explicarse debido a la mayor altitud que posee la cordillera de los andes en el norte de la zona central (latitud 33° sur aproximado), por lo que los glaciares en estudio alcanzan su formación a alturas entre los 5000 y 6000 msnm, y por el contrario, los glaciares al sur de la zona central (latitud 35,5° sur aproximado), alcanzan alturas entre 3000 a 5000 msnm (ver figura 18).

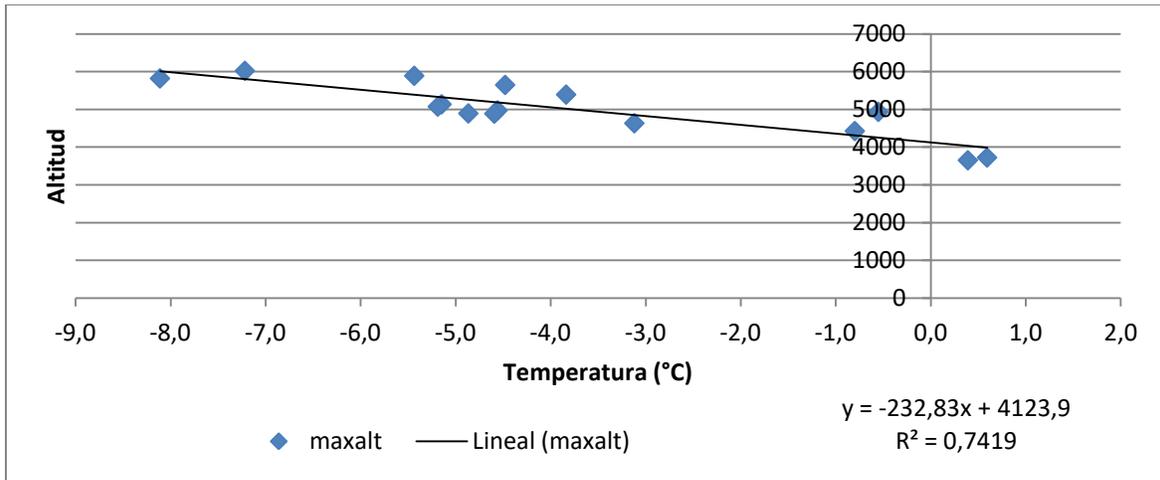
FIGURA 18: MÁXIMA ALTURA (MSNM) DE LOS GLACIARES EN ESTUDIO.



Fuente: Elaboración propia en base a datos de altura de glaciares extraídos de shp de glaciares de la DGA, 2015.

En consecuencia, los glaciares expuestos a temperaturas más altas se localizan al sur de esta. En este sentido se descubre que existe una correlación entre la temperatura promedio y la máxima altura de los glaciares en estudio (ver figura 19), lo cual propicia la formación de glaciares más cálidos hacia el sur de la zona central, específicamente los glaciares Volcán Peteroa y Azufre.

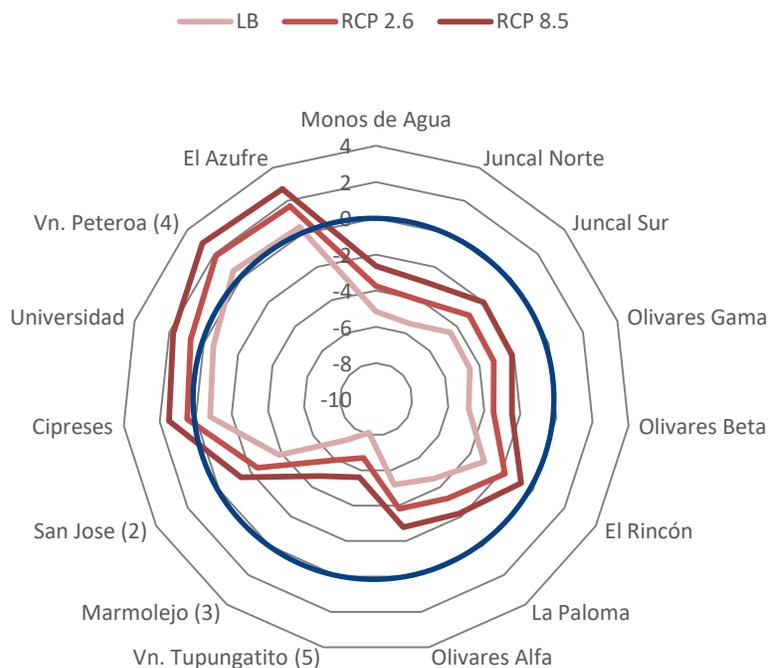
FIGURA 19: CORRELACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA PROMEDIO Y LA MÁXIMA ALTURA (MSNM) DE LOS GLACIARES EN ESTUDIO.



Fuente: Elaboración propia en base a datos de temperatura actuales extraídos de WorldClim 1.4 y datos de altura de glaciares extraídos de shape de glaciares de la DGA, 2015.

En concreto, y como ya se señaló anteriormente, los glaciares Cipreses, Universidad, Volcán. Peteroa y El Azufre, glaciares localizados más al sur, son los glaciares que actualmente presentan las más altas temperaturas medias anuales (-0,79 °C, -0,54 °C, 0,59 °C y 0,39 °C respectivamente) y en ambos escenarios futuros continúan manteniendo las temperaturas más elevadas, siendo mayores en el escenario RCP 8.5. Por lo tanto son estos cuatro glaciares los que están más propensos a alcanzar temperaturas mayores a 0 °C en promedio (ver figura 20).

FIGURA 20: BIO1 – T° MEDIA ANUAL DE GLACIARES, SEGÚN LÍNEA BASE Y ESCENARIOS RCP 2.6 Y RCP 8.5



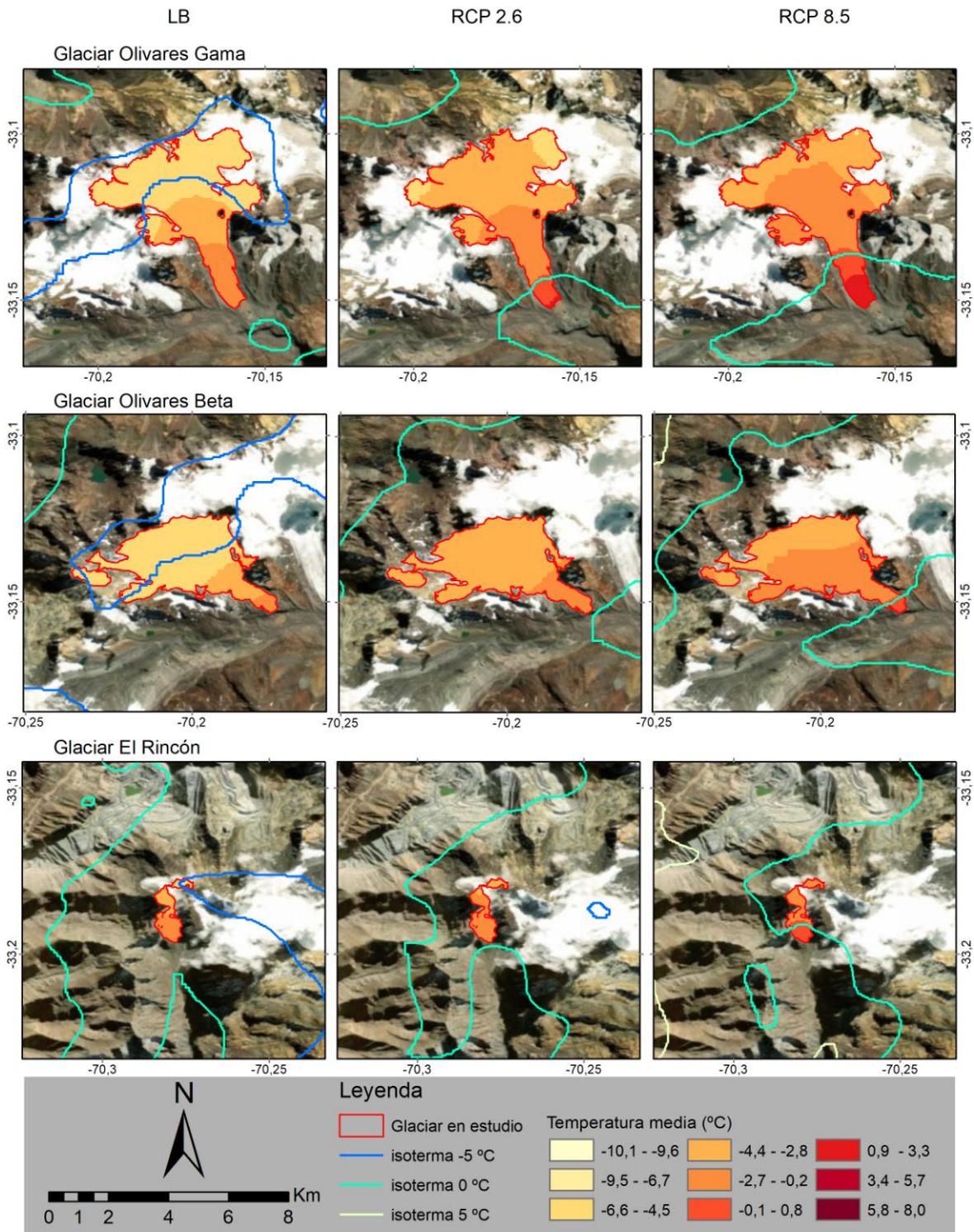
Fuente: Elaboración propia en base a interpolación de datos extraídos de WorldClim 1.4

Los glaciares con temperaturas menos elevadas en el escenario actual, son el Volcán Tupungatito (-8,10 °C) y Marmolejo (-7,21 °C), los que a su vez también mantienen las temperaturas más bajas respecto del resto de los glaciares en escenarios prospectivos (inferiores a -4,75 °C).

Esto significa que los ambientes glaciares más propensos a sufrir variaciones de temperatura respecto del escenario actual, se encuentran al sur de la zona central, lo cual podría posibilitar la aceleración de derretimiento del hielo.

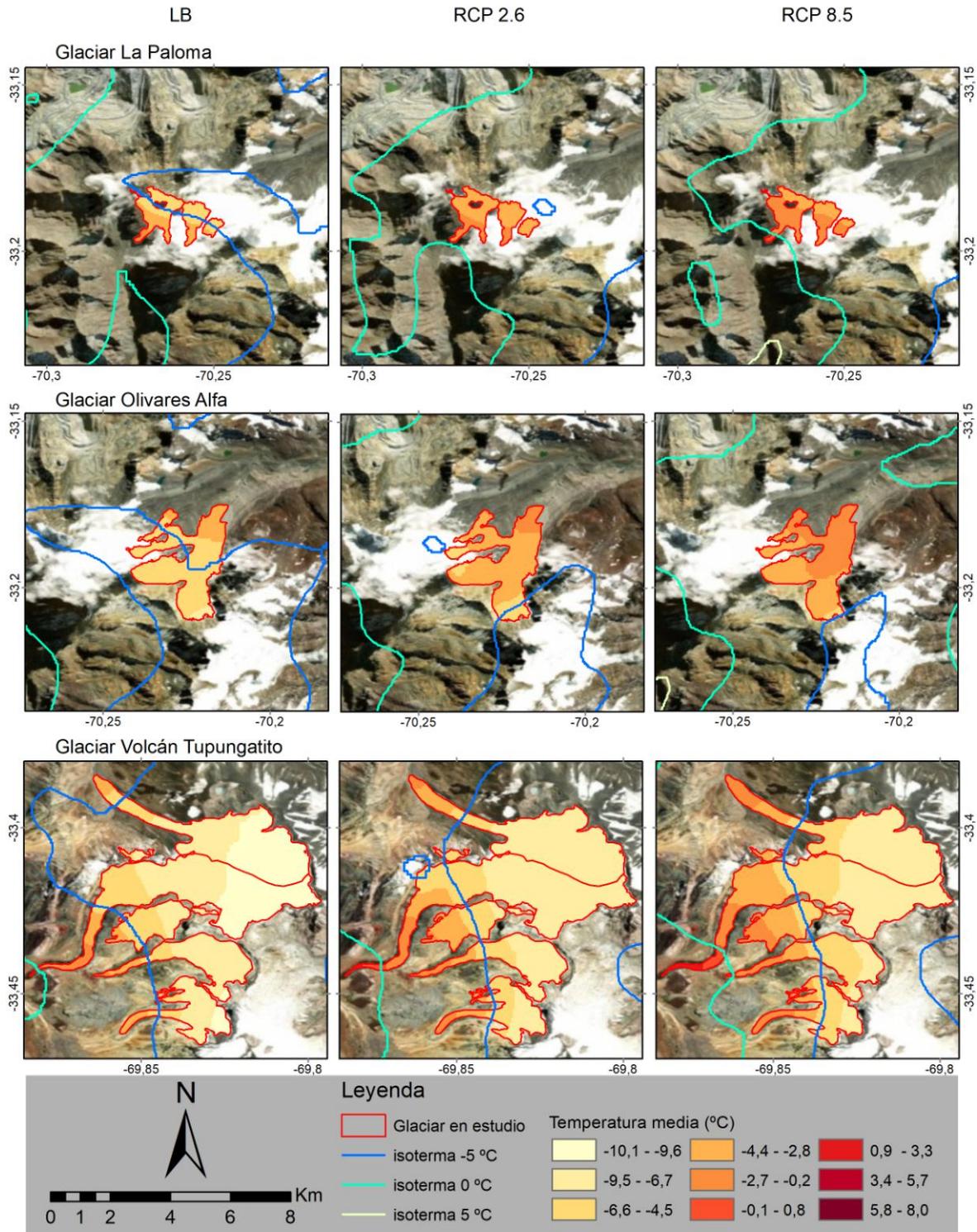
A continuación (ver figura 21 a figura 26) se presentan las variaciones de temperatura media, según los 3 escenarios estudiados. Además se agrega la observación de la variación de la isoterma -5, 0 y 5 °C, para cada glaciar.

FIGURA 22: VARIACIÓN DE TEMPERATURA MEDIA DE CADA GLACIAR EN ESTUDIO, SEGÚN ESCENARIO ACTUAL (LB) Y FUTUROS (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (B)



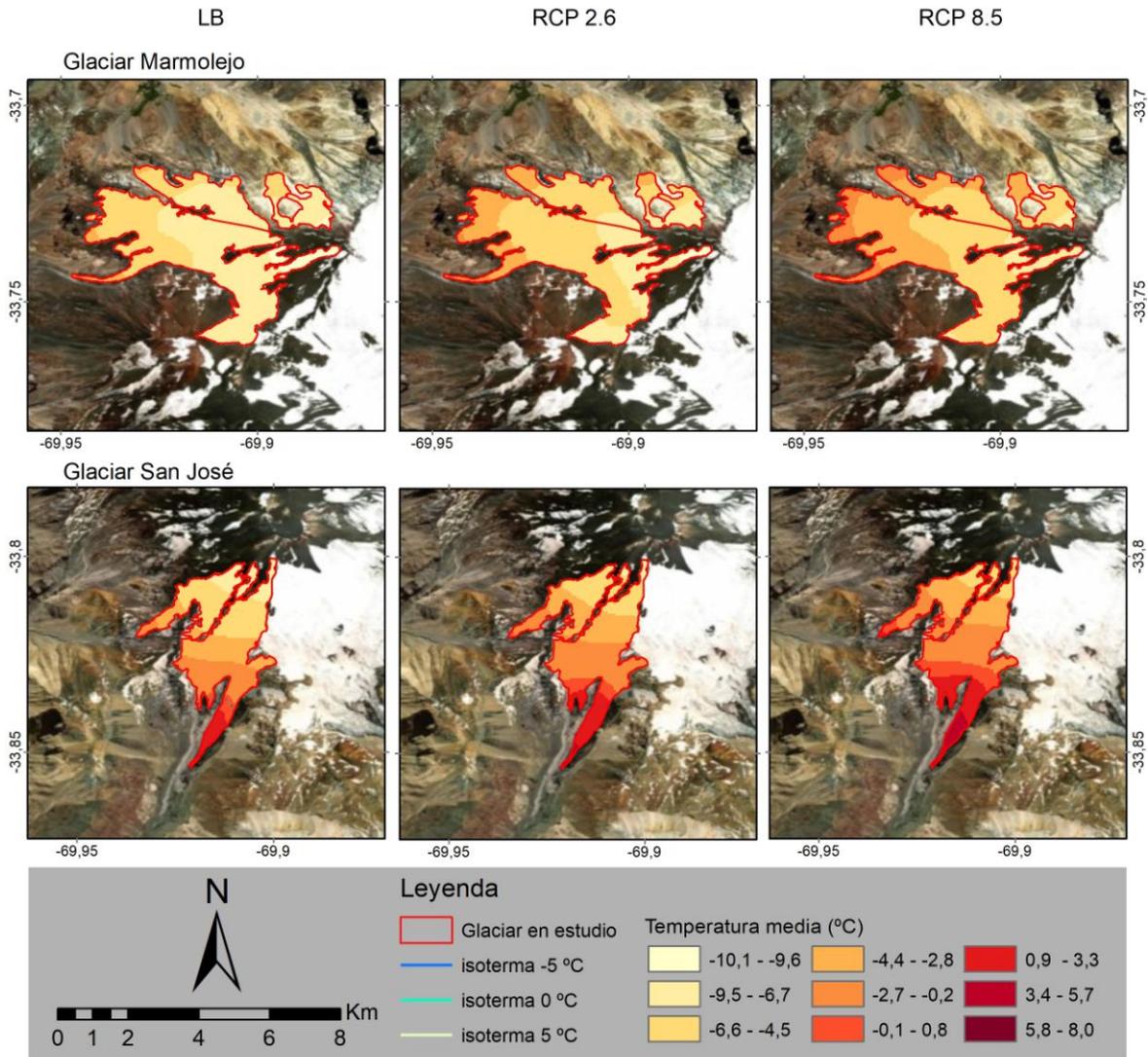
Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes ráster obtenidas de WorldClim 1.4

FIGURA 23: VARIACIÓN DE TEMPERATURA MEDIA DE CADA GLACIAR EN ESTUDIO, SEGÚN ESCENARIO ACTUAL (LB) Y FUTUROS (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (C)



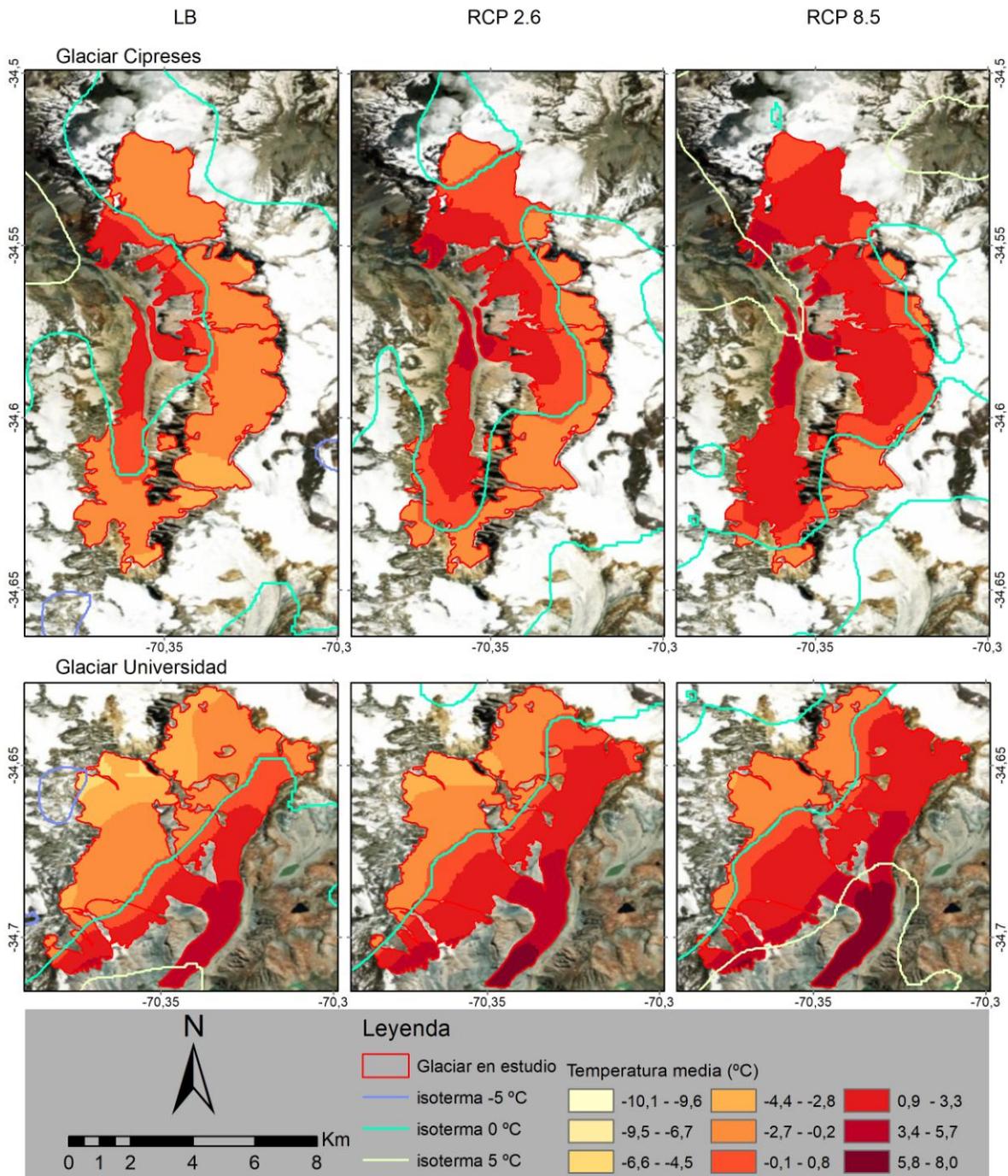
Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes ráster obtenidas de WorldClim 1.4

FIGURA 24: VARIACIÓN DE TEMPERATURA MEDIA DE CADA GLACIAR EN ESTUDIO, SEGÚN ESCENARIO ACTUAL (LB) Y FUTUROS (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (D)



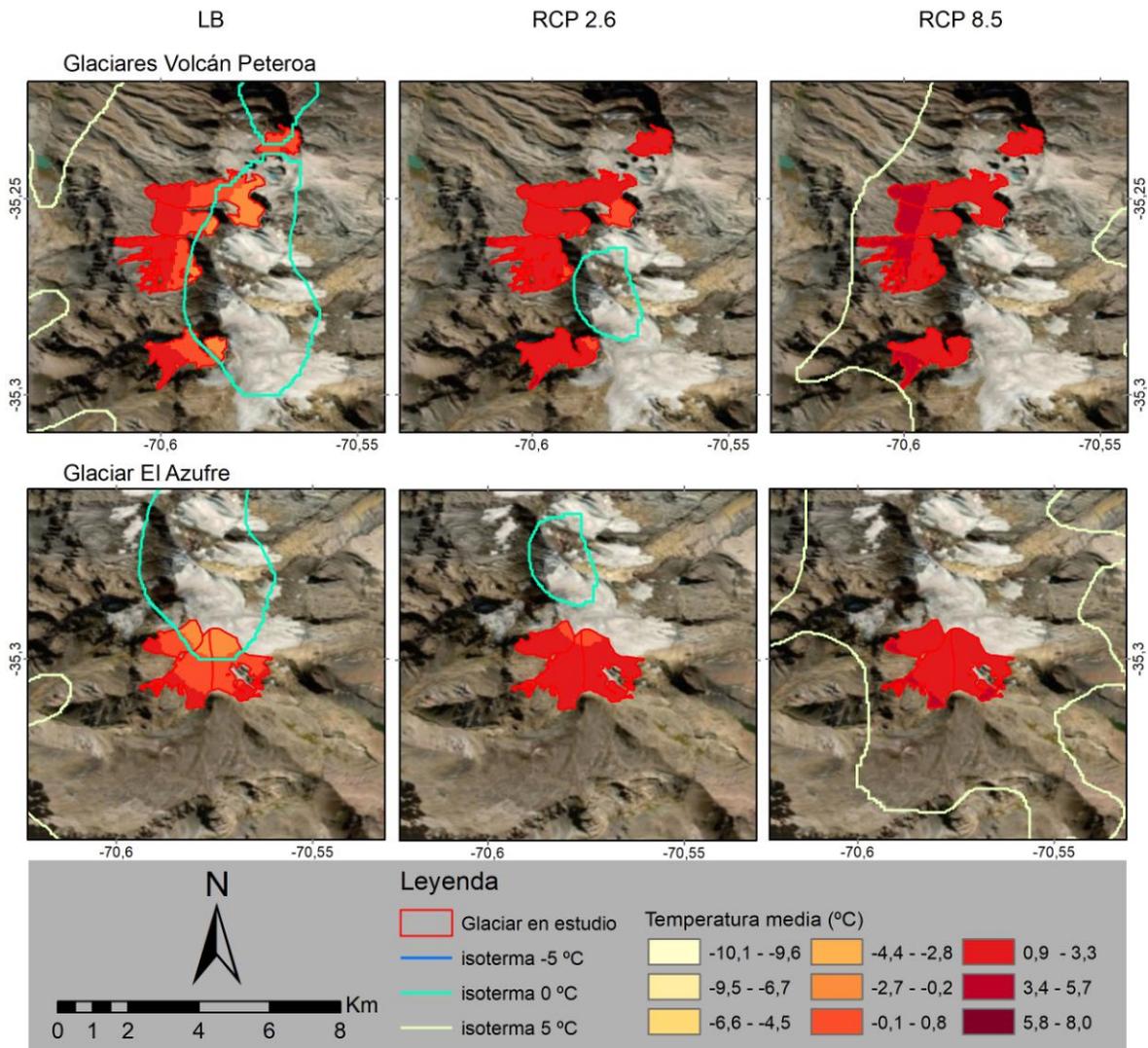
Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes ráster obtenidas de WorldClim 1.4

FIGURA 25: VARIACIÓN DE TEMPERATURA MEDIA DE CADA GLACIAR EN ESTUDIO, SEGÚN ESCENARIO ACTUAL (LB) Y FUTUROS (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (E)



Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes ráster obtenidas de WorldClim 1.4

FIGURA 26: VARIACIÓN DE TEMPERATURA MEDIA DE CADA GLACIAR EN ESTUDIO, SEGÚN ESCENARIO ACTUAL (LB) Y FUTUROS (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (F)



Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes ráster obtenidas de WorldClim 1.4

Las figuras muestran las variaciones de temperatura media anual que sufrirá cada glaciar para los escenarios prospectivos (tanto optimista como pesimista) respecto de la línea base.

A grandes rasgos, mirando todas las figuras se puede constatar variaciones más amplias de temperatura hacia la zona centro sur, al observar que los glaciares cambian completamente sus colores, no así en la zona centro norte, donde los colores de la línea base se mantienen en el escenario optimista y la mayoría de los escenarios pesimistas

En primer lugar (ver figura 21), se observa el glaciar Monos de Agua en el cual se advierte una variación de la temperatura, desplazando la isoterma -5 en los escenarios futuros y encontrándose más cercana al glaciar la isoterma 0 en el escenario pesimista.

En el caso del glaciar Juncal Norte, mantiene la isoterma -5 y 0 en ambos escenarios futuros, pero en el escenario pesimista su lengua glaciar toma valores sobre 5°C.

El glaciar Juncal Sur aumenta sus temperaturas, desplazando la isoterma -5 hacia sectores más elevados y también su lengua glaciar aumenta la temperatura sobre 0°C en el escenario pesimista.

En segundo lugar (ver figura 22), se observa que la isoterma -5 del glaciar Olivares Gamma, Olivares Beta y El Rincón, se desplaza en ambos escenarios, desapareciendo a altitudes más elevadas y cambiando de temperatura en su lengua glaciar, sobrepasando los 0°C en todos los escenarios pesimistas.

En tercer lugar (ver figura 23), el glaciar La Paloma también pierde su isoterma -5 al desplazarse a sectores más elevados y en su lugar, la isoterma 0 se posiciona más cercana al glaciar en el escenario optimista y sobre su lengua glaciar en el escenario pesimista.

Por otro lado el glaciar Olivares Alfa mantiene la isoterma -5 en el escenario optimista, aunque de igual forma se desplaza unos metros y abandona el glaciar en el escenario pesimista.

El Volcán Tupungatito también desplaza la isoterma -5 hacia sectores más elevados del glaciar, pero su variación es mínima en ambos escenarios.

En cuarto lugar (ver figura 24), en el glaciar Marmolejo también se observa el desplazamiento de la isoterma -5 hacia zonas más elevadas del glaciar y en el escenario pesimista una de sus lenguas aumenta su temperatura a 0 °C.

En peor situación se encuentra el glaciar San José, el que ya consta con ambas isotermas (-5 y 0) actualmente y en el escenario pesimista se observa su lengua glaciar acercándose a los 5 °C. Desde este glaciar hacia el sur los glaciares resultan más cálidos que los analizados anteriormente.

Tanto el glaciar Cipreses como Universidad (ver figura 25) se observan con temperaturas actuales rondando los 0°C, sin embargo en el escenario optimista esta isoterma se desplaza hacia sectores más elevados en la cordillera y en el escenario pesimista las lenguas glaciares se observan con temperaturas sobre los 5 °C.

Finalmente los glaciares Volcán Peteroa y El Azufre (ver figura 26) se ven afectados en ambos escenarios, donde la isoterma 0 se ve desplazada y fuera de ambos glaciares en el escenario optimista y en el escenario pesimista la isoterma 0 desaparece del mapa a su vez que se observa un acercamiento, a las lenguas de los glaciares, de la isoterma 5.

5.2.2 PRECIPITACIÓN ANUAL – BIO12

En lo que respecta a la precipitación anual (ver tabla 15), la línea base indica menores precipitaciones en el norte de la zona central, aumentando de manera constante conforme aumenta la latitud sur. Se observa de sus proyecciones una disminución de las precipitaciones tanto en el escenario optimista (en el cual disminuye en promedio 18 mm las precipitaciones) y en el pesimista (en el cual disminuye en promedio 36 mm las precipitaciones), siendo siempre mayor la precipitación hacia el sur.

TABLA 15: DATOS DE PRECIPITACIÓN ANUAL, EN EL ESCENARIO ACTUAL, FUTURO MEDIO OPTIMISTA Y FUTURO MEDIO PESIMISTA

NOMBRE GLACIARES	BIO12 (pp anual)								
	LB			RCP 2.6			RCP 8.5		
	Lb min	Lb max	LB	2.6 min	2.6 max	2.6	8.5 min	8.5 max	8.5
Monos de Agua	397	427	414	398	426	414	388	418	406
Juncal Norte	386	471	435	385	464	432	370	455	420
Juncal Sur	417	463	429	417	458	428	401	448	414
Olivares Gama	424	449	437	426	446	435	408	430	420
Olivares Beta	428	452	443	427	449	441	411	433	424
El Rincón	444	457	448	442	453	445	423	435	427
La Paloma	444	461	453	442	457	450	424	440	432
Olivares Alfa	439	473	454	437	468	452	419	452	433
Vn. Tupungatito	440	512	479	434	501	471	423	496	463
Marmolejo	488	543	505	476	525	492	463	517	481
San José	496	525	502	483	508	489	469	499	475
Cipreses	623	759	655	583	703	610	559	671	584
Universidad	628	791	669	582	732	621	560	698	595
Vn. Peteroa	718	764	738	655	694	672	621	656	635
El Azufre	721	755	732	657	686	667	622	646	632

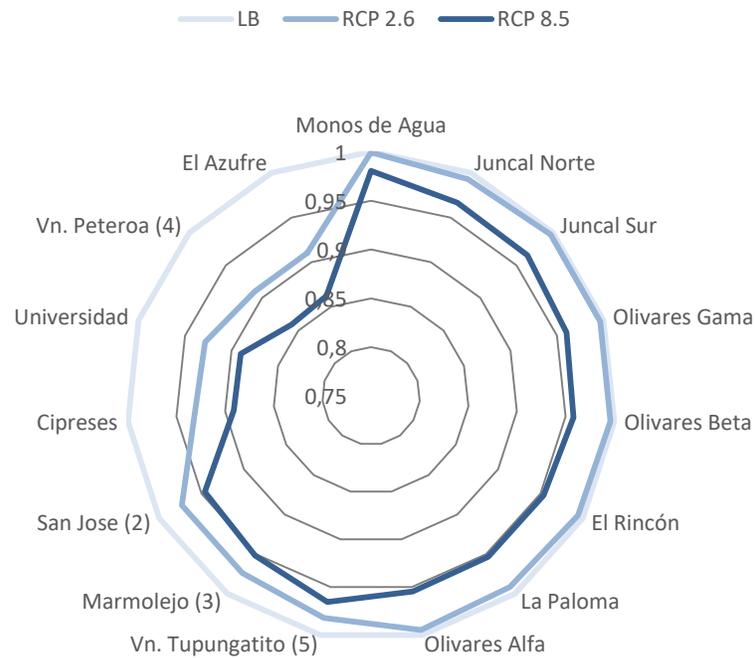
Fuente: Elaboración propia a partir de datos extraídos de WorldClim 1.4 (2019)

Específicamente los glaciares que reciben menor aporte de agua en los tres escenarios de análisis son los glaciares Monos de Agua (414 mm en la línea base y escenario RCP 2.6 y 406 mm en el escenario RCP 8.5), Juncal Norte (434 mm, 431 mm y 419 mm en escenario actual, RCP 2.6 y RCP 8.5 respectivamente) y Juncal sur (428 mm, 427 mm y 414 mm también en el orden: escenario actual, RCP 2.6 y RCP 8.5 respectivamente).

Pese a que los tres glaciares nombrados anteriormente se analizan porque tienen menos probabilidad de lluvia, se aprecia que en todos los glaciares existe una disminución paulatina de esta, en ambos escenarios, precipitando menos en el escenario RCP 8.5.

De igual importancia, cabe mencionar los glaciares que reciben mayor aporte hídrico, los cuales se encuentran hacia el sur, pero se ven afectados en los escenarios prospectivos por la disminución de la precipitación (ver figura 27)

FIGURA 27: BIO12 – BAJA (%) DE LA PP MEDIA ANUAL DE GLACIARES, RESPECTO DE SU LÍNEA BASE



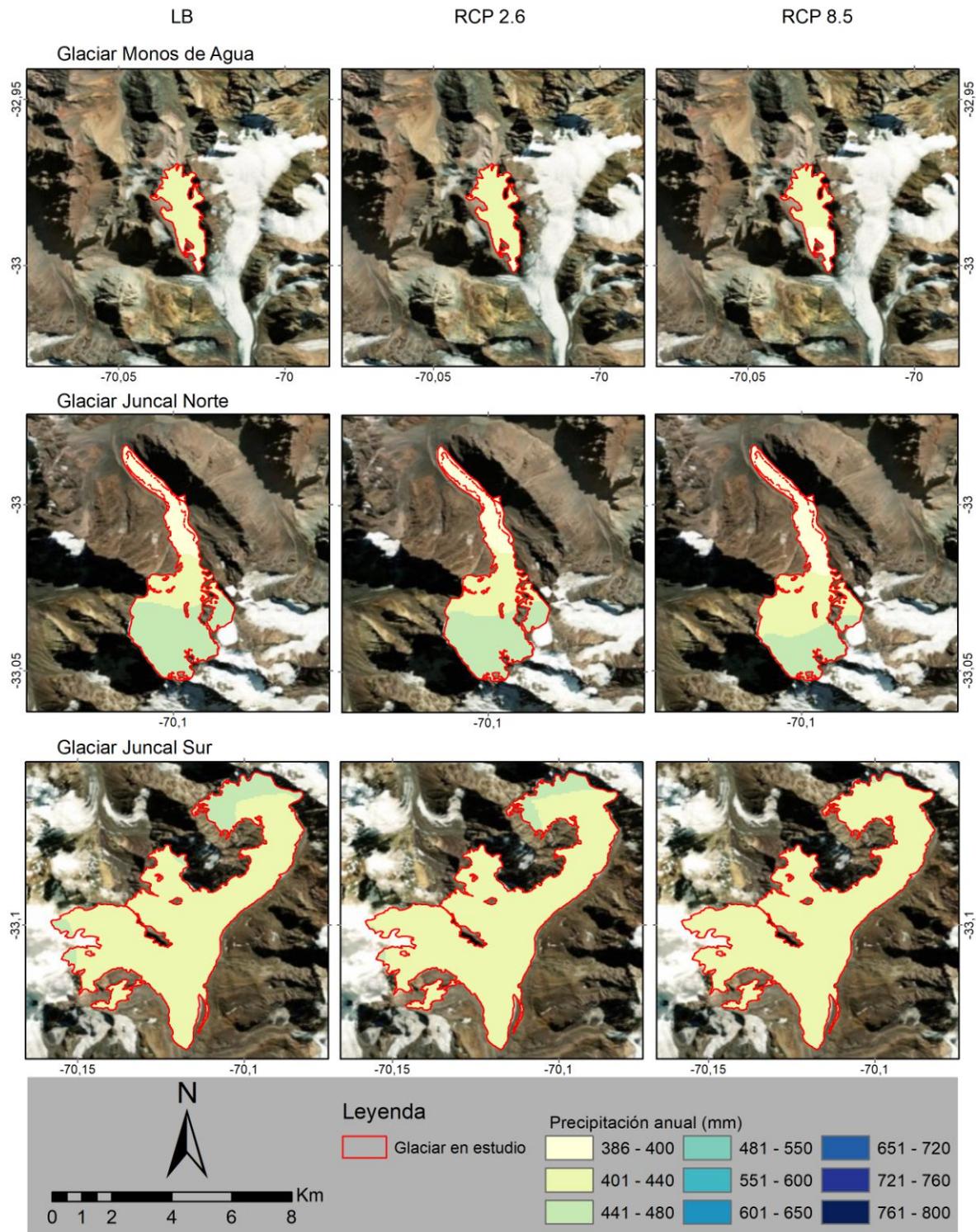
Fuente: Elaboración propia a partir de interpolación de datos extraídos de WorldClim 1.4 (2019)

En este sentido, resulta interesante destacar la posible variación de precipitación a la que se exponen los glaciares en medida que aumenta la latitud hacia el sur respecto del escenario actual, presentando una variación de precipitación negativa, de hasta 63 mm para el glaciar El Azufre en el escenario optimista y hasta 100 mm para el escenario pesimista, lo que se traduce de manera porcentual en 91% Y 86% respectivamente, en relación con la precipitación actual.

Se nombra este glaciar por ser el que posiblemente tenga mayor afectación respecto de la precipitación actual que recibe. A este escenario de vulnerabilidad, también se suman los glaciares Cipreses, Universidad y Volcán Peteroa

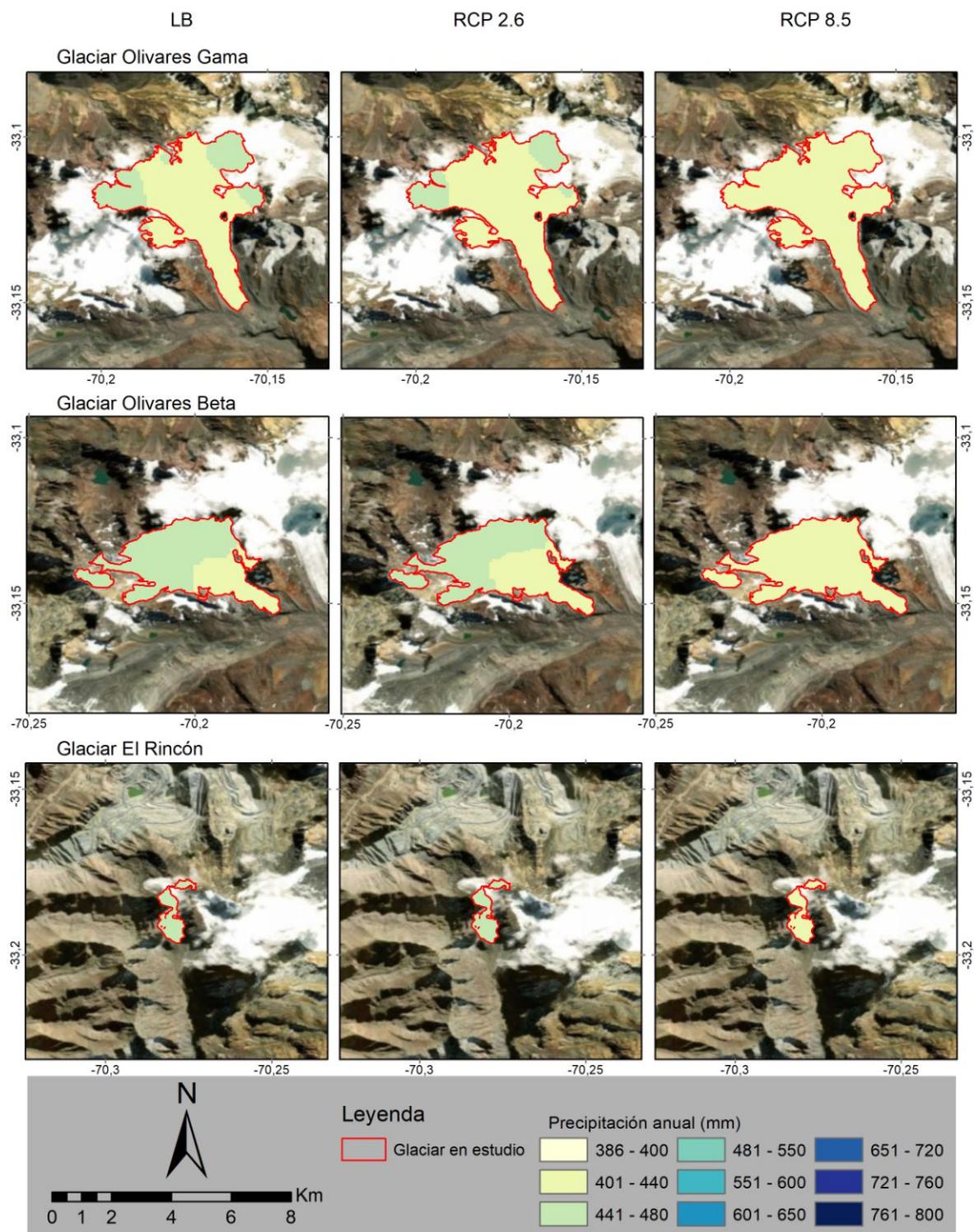
A continuación (ver figuras 28 a 33), se presentan las variaciones de precipitación para cada glaciar, según los tres escenarios estudiados.

FIGURA 28: VARIACIÓN DE PRECIPITACIÓN ANUAL DE CADA GLACIAR EN ESTUDIO, SEGÚN ESCENARIO ACTUAL (LB) Y FUTUROS (RCP 2.6 Y RCP 8.5 (A))



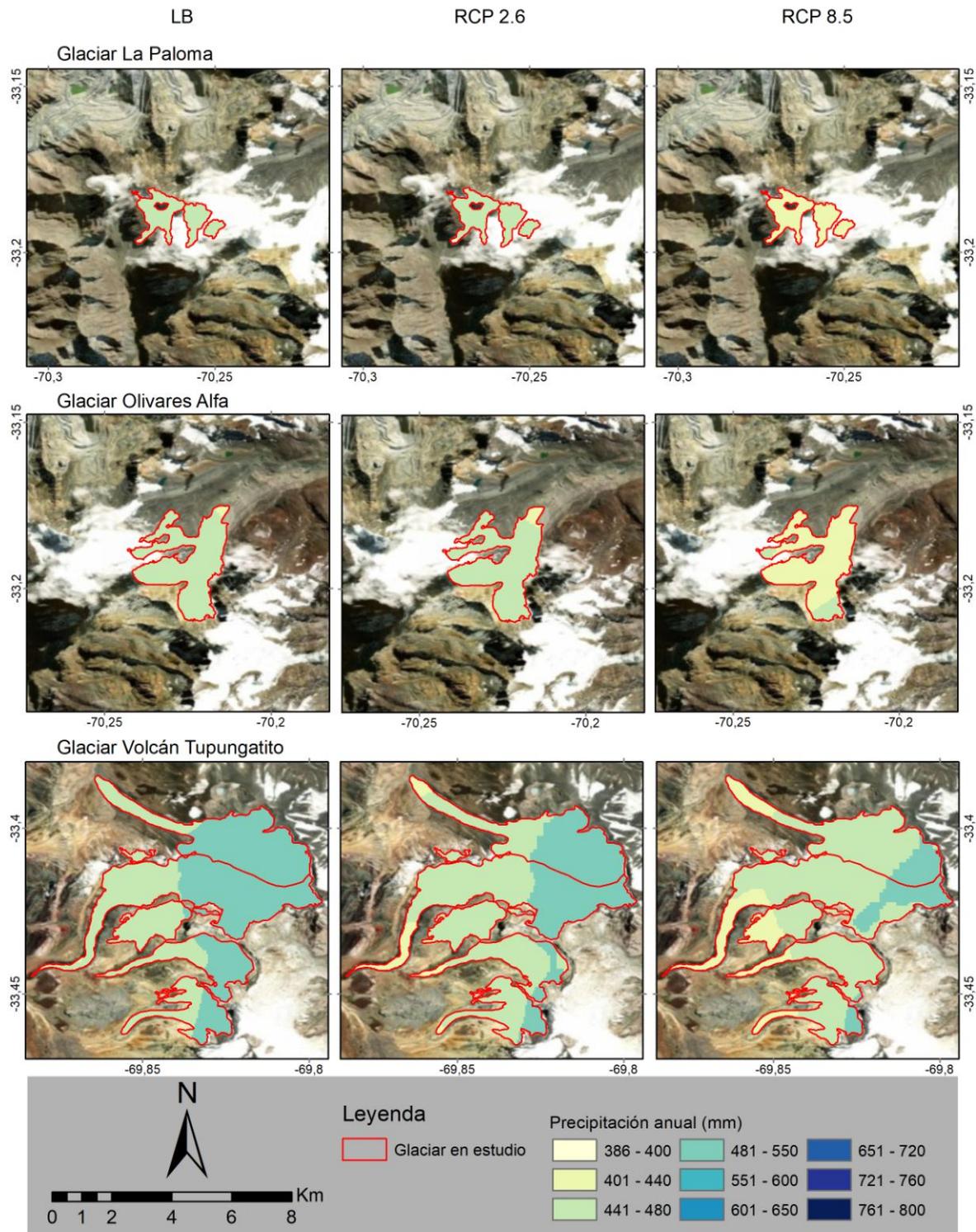
Fuente: Elaboración propia en base a imágenes raster obtenidas de WorldClim 1.4

FIGURA 29: VARIACIÓN DE PRECIPITACIÓN ANUAL DE CADA GLACIAR EN ESTUDIO, SEGÚN ESCENARIO ACTUAL (LB) Y FUTUROS (RCP 2.6 Y RCP 8.5 (B))



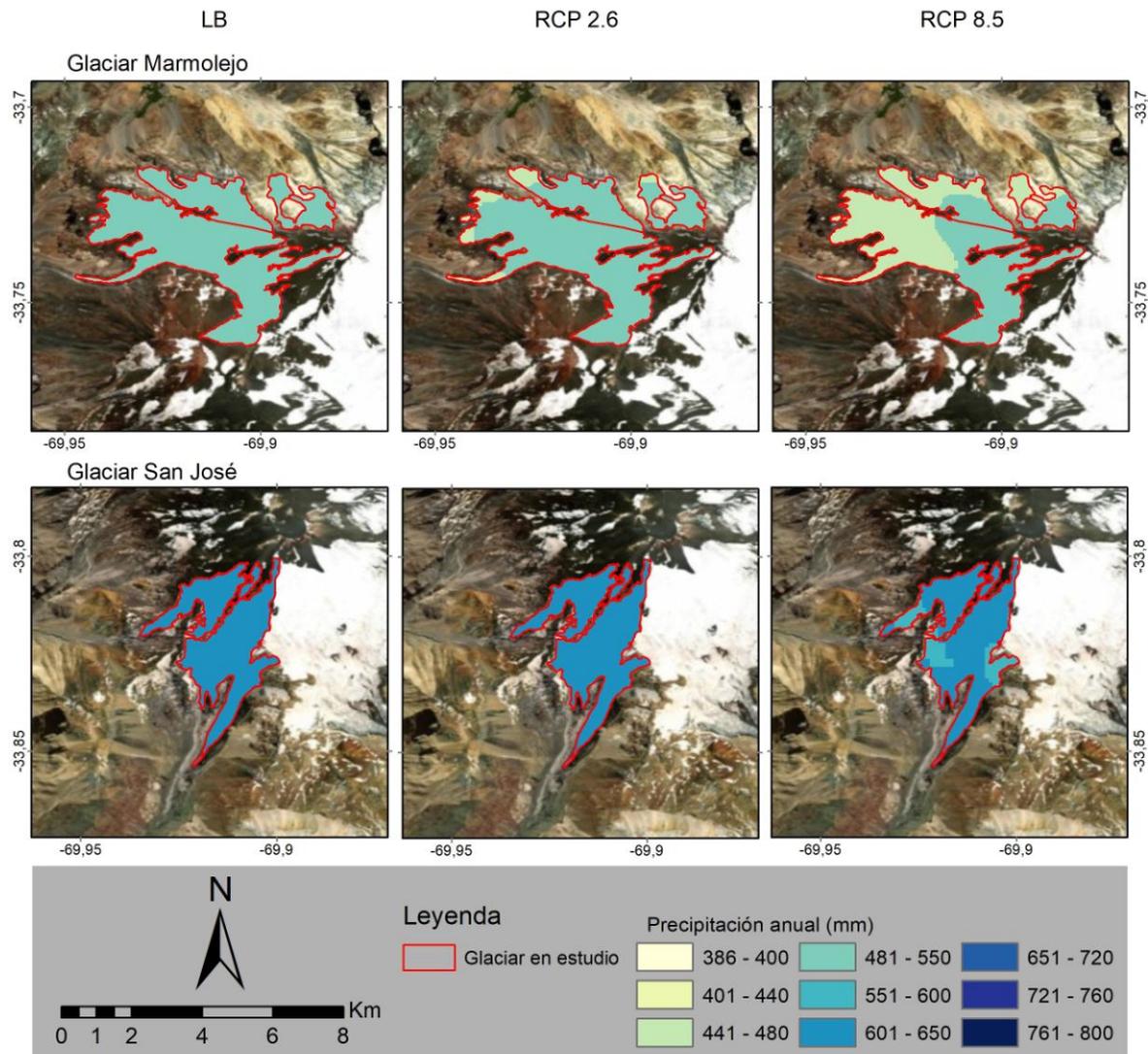
Fuente: Elaboración propia en base a imágenes raster obtenidas de WorldClim 1.4

FIGURA 30: VARIACIÓN DE PRECIPITACIÓN ANUAL DE CADA GLACIAR EN ESTUDIO, SEGÚN ESCENARIO ACTUAL (LB) Y FUTUROS (RCP 2.6 Y RCP 8.5 (C))



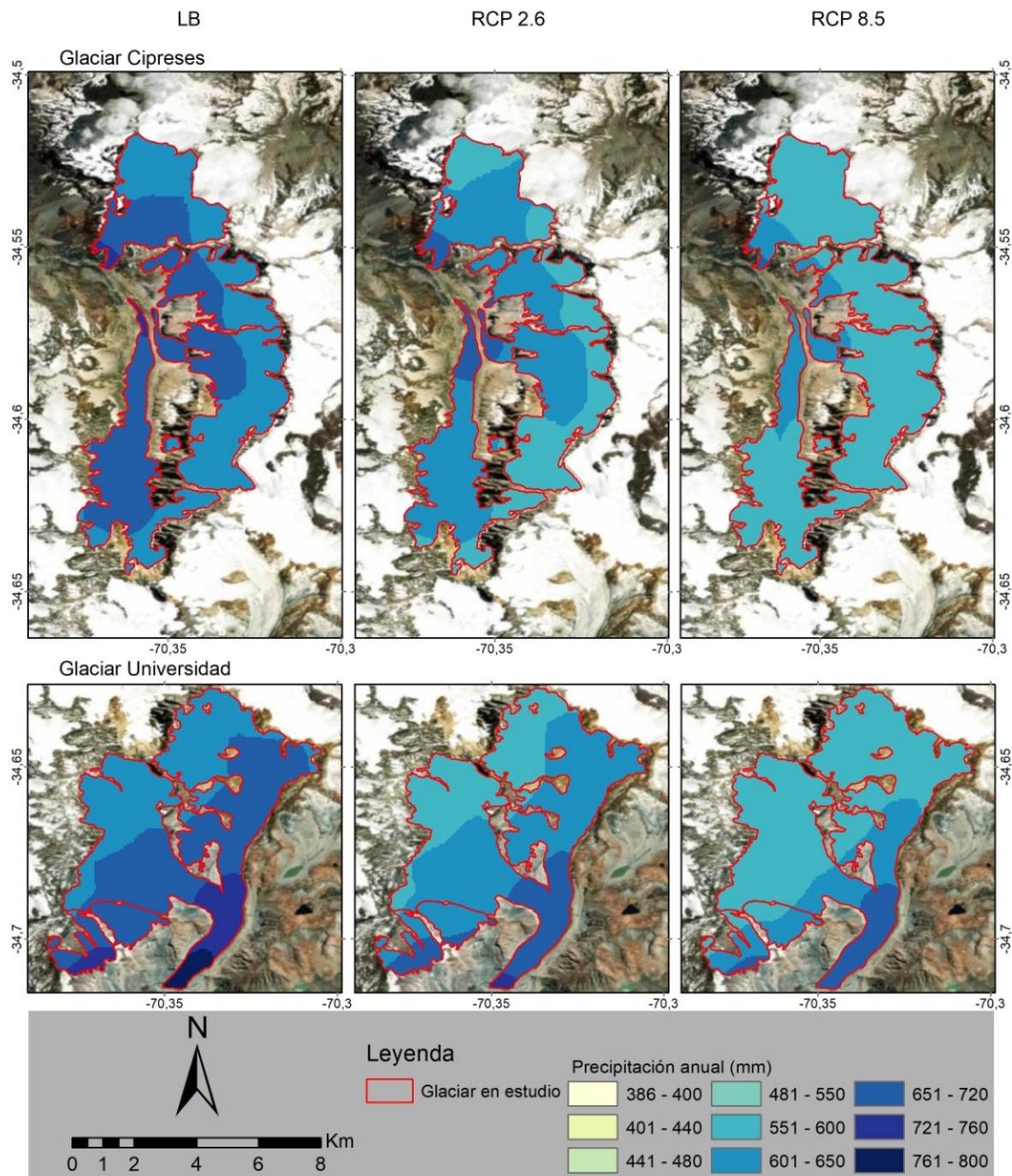
Fuente: Elaboración propia en base a imágenes raster obtenidas de WorldClim 1.4

FIGURA 31: VARIACIÓN DE PRECIPITACIÓN ANUAL DE CADA GLACIAR EN ESTUDIO, SEGÚN ESCENARIO ACTUAL (LB) Y FUTUROS (RCP 2.6 Y RCP 8.5 (D))



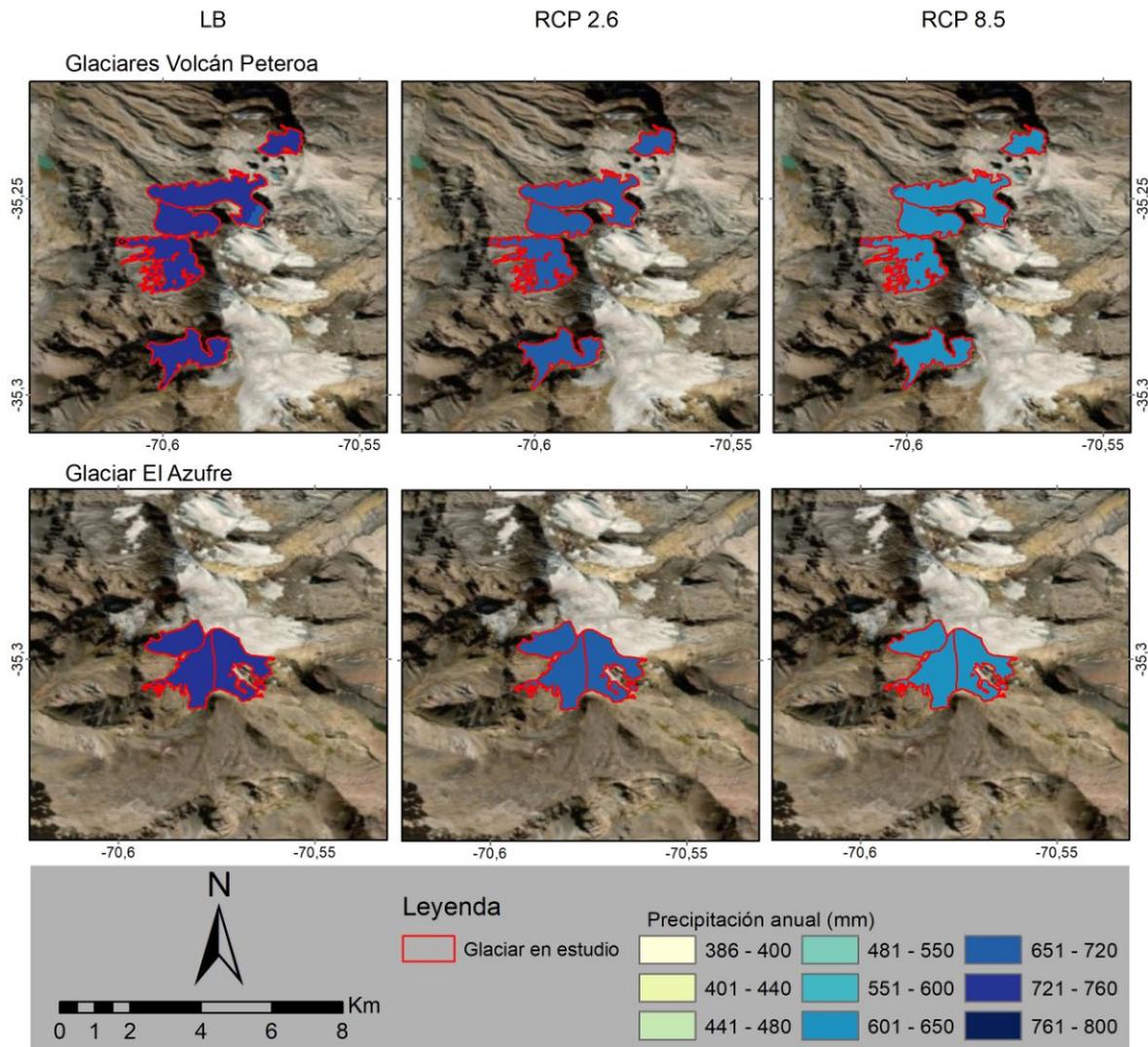
Fuente: Elaboración propia en base a imágenes raster obtenidas de WorldClim 1.4

FIGURA 32: VARIACIÓN DE PRECIPITACIÓN ANUAL DE CADA GLACIAR EN ESTUDIO, SEGÚN ESCENARIO ACTUAL (LB) Y FUTUROS (RCP 2.6 Y RCP 8.5 (E))



Fuente: Elaboración propia en base a imágenes raster obtenidas de WorldClim 1.4

FIGURA 33: VARIACIÓN DE PRECIPITACIÓN ANUAL DE CADA GLACIAR EN ESTUDIO, SEGÚN ESCENARIO ACTUAL (LB) Y FUTUROS (RCP 2.6 Y RCP 8.5) (F)



Fuente: Elaboración propia en base a imágenes raster obtenidas de WorldClim 1.4

Las figuras muestran las variaciones de precipitación anual que sufrirá cada glaciar para los escenarios prospectivos (tanto optimista como pesimista) respecto de la línea base.

Al observar todas las figuras se puede constatar variaciones más amplias de precipitación hacia la zona centro sur, ya que los glaciares cambian completamente sus colores, no así en la zona centro norte, donde los colores de la línea base se mantienen en el escenario optimista y la mayoría de los escenarios pesimistas

En primer lugar, se observan las variaciones de precipitación para los glaciares Monos de Agua, Juncal Norte y Juncal Sur (ver figura 28), las cuales son prácticamente nulas entre la línea base y el escenario optimista, y entre la línea base y el escenario pesimista, se

observa una disminución en la zona alta de los glaciares de alrededor de 40 mm y un rango de precipitaciones de 380 a 480 mm

En segundo lugar (ver figura 29) al igual que el análisis de la figura anterior, la variación de precipitación para el escenario optimista es prácticamente nula, pero para el escenario pesimista en los tres glaciares se observa la pérdida de 40 mm de precipitación aproximado respecto de la línea base, manteniéndose entre 401 y 440 mm de precipitación

En tercer lugar (ver figura 30) se observa el glaciar La Paloma y Olivares Alfa sin variación de precipitación en el escenario optimista, con respecto a la línea base, pero en el escenario pesimista la precipitación disminuye de 441 - 480 mm a 401 - 440 mm en la mayor parte del glaciar.

Para el glaciar Volcán Tupungatito la variación es un tanto mayor para el escenario optimista, en comparación con los glaciares anteriores, disminuyendo la precipitación en parte de las lenguas glaciares de 441 - 480 mm a 401 - 440 mm y disminuyendo la precipitación en las zonas más altas del glaciar de 481 - 550 mm a 441- 480 mm, siendo más notoria esta variación en el escenario pesimista.

En cuarto lugar (ver figura 31), el glaciar Marmolejo varía levemente la precipitación en el escenario optimista, y disminuye con mayor notoriedad en el escenario pesimista, específicamente en sus lenguas glaciares, de 481 - 550 a 441 - 480 mm anuales

En quinto lugar (ver figura 32) se observan los glaciares Cipreses y Universidad con variaciones en la precipitación, tanto en el escenario optimista, como pesimista.

El glaciar Cipreses pasa de contar con precipitaciones entre 651 - 760 mm anuales a precipitaciones entre 601 y 720 mm anuales, en el escenario pesimista.

Por otro lado, el glaciar Universidad de recibir una precipitación entre 601 - 800 mm, pasa a recibir entre 551 -760 mm en el escenario optimista y 551 - 720 mm en el escenario pesimista

Finalmente se proyectan cambios drásticos en ambos escenarios para los glaciares localizados más al sur dentro del área de (ver figura 33). Tanto el glaciar Volcán Peteroa como El azufre, reciben una precipitación anual entre 721 - 760 mm actualmente, pero para el escenario optimista se espera que la precipitación disminuya y reciban entre 651 - 720 mm anuales. Peor es el caso del escenario pesimista, en el que se espera reciban una precipitación de 601 - 650 mm anuales.

5.3 RESULTADO 3: ANÁLISIS CORRELACIONAL ENTRE LAS PROYECCIONES DE CAMBIOS CLIMÁTICOS Y LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS GLACIARES EN ESTUDIO

En efecto, luego de la recolección, síntesis y análisis de las distintas variables y sus datos se presenta a continuación la relación entre las mismas, mediante el Coeficiente de correlación de Pearson (ver figura 34).

Los resultados muestran una correlación negativa entre las variables altura máxima y las temperaturas medias (r de Pearson igual a $-0,86$) y mínimas (r de Pearson igual a $-0,98$) tanto en la línea base y escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, lo cual significa que a mayor altura menor temperatura.

También la altura mínima se correlaciona negativamente con las temperaturas medias ($r = -0,60$) y las temperaturas máximas (r de Pearson igual a $-0,98$), es decir a mayor altura menor es la temperatura, esto también aplica en el escenario actual y en las proyecciones futuras.

A su vez, los resultados arrojan que las alturas máximas y mínimas se relacionan negativamente con la precipitación (r de Pearson igual a $-0,68$ aproximadamente) en todos los escenarios (línea base, RCP 2.6 y RCP 8.5), esto quiere decir que a mayor altura menor es la precipitación.

Por otro lado, se observa una correlación positiva entre la temperatura media anual y la precipitación anual (r de Pearson igual a $0,8$ aproximadamente), es decir que a mayor temperatura mayor es la precipitación. Este resultado aplica para la línea base y para los dos escenarios futuros.

El área inicial y final se correlacionan positivamente con el espesor (r de Pearson igual a $0,72$ y r de Pearson igual a $0,69$ respectivamente), es decir a mayor área mayor espesor.

Por último, la variación porcentual de los glaciares tiene una relación positiva con la pendiente glaciar (r de Pearson igual a $0,539$), lo que quiere decir que a mayor pendiente mayor es el porcentaje de variación al que se exponen los glaciares, permitiendo su deformación más prontamente.

Finalmente se hace necesario resaltar que las otras variables analizadas (orientación y variación areal en km^2 para los periodos comprendidos y por año) no presentan relaciones lineales con el resto de las variables, sin embargo, esto no quiere decir que no puedan presentar otro tipo de relaciones que no sean observables en esta tabla.

FIGURA 34: VALORES DE CORRELACIÓN DE PEARSON PARA LAS VARIABLES ANALIZADAS

	BIO1 LB min	BIO1 LB max	BIO1 LB	BIO1 26min	BIO1 26max	BIO1 26	BIO1 85min	BIO1 85max	BIO1 85	BIO12 LB min	BIO12 LB max	BIO12 LB	BIO12 26min	BIO12 26max	BIO12 26	BIO12 85min	BIO12 85max	BIO12 85	altura min	altura max	orientación (°)	área inicial (km ²)	área final (km ²)	V. areal (km ²)	Tasa de V. areal (km ² a ⁻¹)	Variación (%)
BIO1 LBmin	1																									
BIO1 LBmax	0,256	1																								
BIO1 LB	0,886	0,567	1																							
BIO1 26min	1,000	0,246	0,880	1																						
BIO1 26max	0,235	0,999	0,547	0,225	1																					
BIO1 26	0,885	0,568	1,000	0,879	0,548	1																				
BIO1 85min	1,000	0,247	0,881	1,000	0,227	0,880	1																			
BIO1 85max	0,237	0,999	0,550	0,227	1,000	0,551	0,228	1																		
BIO1 85	0,884	0,568	1,000	0,879	0,549	1,000	0,880	0,552	1																	
BIO12 LBmin	0,724	0,690	0,851	0,714	0,569	0,849	0,715	0,572	0,849	1																
BIO12 LBmax	0,604	0,725	0,804	0,591	0,707	0,802	0,592	0,709	0,802	0,955	1															
BIO12 LB	0,688	0,653	0,832	0,677	0,633	0,829	0,679	0,636	0,830	0,993	0,977	1														
BIO12 26min	0,726	0,575	0,850	0,716	0,554	0,848	0,717	0,557	0,848	0,999	0,950	0,990	1													
BIO12 26max	0,585	0,731	0,793	0,571	0,713	0,790	0,572	0,714	0,790	0,945	0,999	0,969	0,940	1												
BIO12 26	0,681	0,653	0,827	0,670	0,634	0,825	0,671	0,636	0,825	0,993	0,979	1,000	0,990	0,972	1											
BIO12 85min	0,705	0,581	0,838	0,695	0,560	0,835	0,696	0,562	0,835	0,999	0,955	0,990	0,999	0,946	0,991	1										
BIO12 85max	0,538	0,742	0,761	0,524	0,725	0,759	0,525	0,726	0,759	0,932	0,996	0,960	0,927	0,998	0,963	0,935	1									
BIO12 85	0,650	0,665	0,807	0,639	0,646	0,804	0,640	0,648	0,804	0,989	0,983	0,998	0,985	0,976	0,999	0,988	0,970	1								
altura min	-0,286	-0,983	-0,599	-0,275	-0,979	-0,600	-0,276	-0,979	-0,600	-0,619	-0,765	-0,679	-0,607	-0,773	-0,680	-0,613	-0,783	-0,692	1							
altura max	-0,985	-0,221	-0,861	-0,984	-0,200	-0,860	-0,983	-0,202	-0,859	-0,753	-0,607	-0,709	-0,758	-0,587	-0,703	-0,739	-0,542	-0,674	0,243	1						
orientación °	0,158	0,091	0,144	0,154	0,080	0,140	0,156	0,072	0,141	0,472	0,429	0,456	0,485	0,427	0,461	0,503	0,443	0,479	-0,126	-0,235	1					
área inicial (km ²)	-0,206	0,333	0,023	-0,218	0,333	0,021	-0,219	0,331	0,021	0,220	0,411	0,270	0,220	0,433	0,278	0,239	0,464	0,302	-0,389	0,228	0,395	1				
área final (km ²)	-0,170	0,444	0,062	-0,184	0,445	0,061	-0,185	0,442	0,060	0,207	0,432	0,268	0,206	0,458	0,278	0,226	0,488	0,303	-0,510	0,198	0,348	0,957	1			
V. areal (km ²)	0,025	0,313	0,140	0,023	0,322	0,142	0,024	0,322	0,145	0,083	0,159	0,116	0,072	0,160	0,114	0,078	0,169	0,124	-0,263	-0,030	-0,187	0,090	0,174	1		
Tasa de V. areal (km ² a ⁻¹)	0,178	0,204	0,147	0,182	0,211	0,150	0,180	0,208	0,149	-0,242	-0,168	-0,226	-0,245	-0,159	-0,227	-0,253	-0,177	-0,237	-0,228	-0,118	-0,453	-0,285	-0,033	0,221	1	
Variación (%)	-0,256	0,201	-0,159	-0,257	0,207	-0,158	-0,259	0,201	-0,160	-0,372	-0,221	-0,339	-0,372	-0,199	-0,332	-0,366	-0,190	-0,322	-0,247	0,289	-0,264	-0,003	0,228	0,212	0,748	1

Fuente: Elaboración propia, 2019

CAPITULO 6: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

6.1 DISCUSIONES

El proceso de *downscaling* o mejorar la escala de imágenes raster de resolución moderada ha sido utilizada por diversos autores en Chile (Bustos, Meza, & Vicuña, 2012; Rojas, 2009; McPhee, y otros, 2014) e instituciones (Centro de Cambio Global UC, Centro de Estudios Científicos de Valdivia, entre otras) para generar análisis de cambios en la variabilidad climática.

En este estudio este método permitió la observación y análisis de información climática de precipitación y temperaturas a niveles muy finos (1 km hasta 50 m), evidenciando lo que ya señalaban diversos estudios (CONAMA, 2006; Santibañez, 2016; Quintero-Angel, Carvajal-Escobar, & Aldunce, 2012; MMA, 2014; (CR)2, 2015) respecto del aumento de las temperaturas y la disminución de precipitaciones a futuro en Chile central.

Para todos los glaciares estudiados (tanto en los escenarios optimista y pesimista de emisiones de CO₂) los que se sitúan en la parte sur del área de estudio estarían mayormente expuestos a cambios más significativos de temperatura y precipitación.

Los glaciares El Azufre, Volcán Peteroa, Cipreses y Universidad se proyectan condiciones climáticas de temperaturas medias anuales mayores a 0°C, de los cuales los dos últimos, actualmente, mantienen temperaturas inferiores a cero grados Celsius, siendo más vulnerables a considerarse glaciares cálidos en ambos escenarios futuros. En cuanto a las precipitaciones, si bien se proyecta más lluvias hacia el sur de la zona central en los dos escenarios, estas disminuirían considerablemente en estos cuatro glaciares.

En este sentido, el coeficiente de correlación de Pearson indica una correlación positiva (r de Pearson igual a 0,8) entre la precipitación anual y la temperatura media anual, para la línea base y ambos escenarios, afectando la línea de nieves que se desplaza a medida que aumenta la temperatura y provoca mayor precipitación en las zonas donde anteriormente caía nieve.

Destaca también la altitud como un factor determinante sobre la temperatura (r de Pearson igual a -0,98), donde a mayor altura menor es la temperatura y viceversa. De igual modo, se observa la altitud como factor determinante sobre las precipitaciones (r de Pearson igual a -0,68), donde a mayor altura menor es la precipitación y viceversa. Por último, existen correlaciones positivas entre el espesor y el área (r de Pearson igual a 0,69), y la pendiente y el porcentaje de variación areal (r de Pearson igual a 0,53).

Los escenarios proyectados propician condiciones para la pérdida de masa glaciar hacia el centro sur, considerando las menores altitudes y las proyecciones de aumento de temperaturas y disminución de las precipitaciones. Es decir, se dan condiciones para la

aceleración de derretimiento de hielo, especialmente en los glaciares El Azufre y Volcán Peteroa.

Así, los resultados son consistentes con el estudio de “Variaciones recientes de glaciares en Chile según zonas glaciológicas” (DGA, 2011), donde se observan tendencias actuales a la reducción de la superficie glaciar a nivel generalizado en el país, en respuesta a los efectos del cambio climático, pero específicamente en la zona central, los glaciares que más área han perdido respecto de su área inicial son justamente los ya nombrados: El Azufre y Volcán Peteroa

Se suma a estas condiciones el ambiente volcánico en el cual se insertan estos glaciares, donde, además de las condiciones de transferencia de energía desde la atmósfera, también está la existencia de amenaza de generación de lahares, propiciando el derretimiento más temprano de glaciares. Ello pone en peligro las condiciones para que estas masas de hielo se mantengan.

En consecuencia, y de acuerdo con las pruebas expuestas en los resultados y considerando la importancia que tienen los glaciares en el aporte de caudales, es que hacia mediados del siglo XXI, los caudales del centro sur podrían disminuir, poniendo en peligro la sustentabilidad de la cuenca del río Mataquito, entre otras.

Pasos futuros deberían incluir ampliar el monitoreo de glaciares y de otras variables, como por ejemplo la variabilidad de temperaturas y precipitaciones según las estaciones secas y húmedas, la transferencia energética entre la atmósfera y el hielo, las relaciones entre los eventos atmosféricos ENSO y la variación de la superficie glaciar y la influencia humana aledaña a los glaciares (como la minería o la actividad turística), sumado además el grado de incertidumbre que conllevan las proyecciones hacia el futuro, “después de todo, la vulnerabilidad futura dependerá de decisiones humanas, difíciles de establecer o definir. Se puede generar un abanico de posibilidades de condiciones de vulnerabilidad futura y su rango reflejará la incertidumbre asociada” (Magaña, 2013).

Por lo tanto, en el presente estudio existen muchos factores que no fueron considerados, lo que no permite ser tajante en las prospecciones y más bien deben tomarse como recomendaciones para priorizar áreas que posiblemente tengan problemas de escases hídrica en un futuro más pronto, especialmente en periodos de estiaje, ya que como señalan expertos “La importancia de estos glaciares de montaña (en la zona central de Chile) es que actúan como retenedores del recurso hídrico en época de invierno, entregando agua en periodo de estiaje o bien cuando las lluvias son escasas” (Urrutia, 2018). En concordancia con lo expuesto, es que se torna fundamental recabar mayores antecedentes que nutran la base teórica para futuras investigaciones.

Sin embargo, se analizaron algunas cualidades externas como internas de la criosfera que resultan susceptibles a los efectos adversos del cambio climático, teniendo una orientación física y se constató semejanzas entre los registros ya estudiados y las proyecciones de escenarios futuros realizadas en el presente documento. Es por esto que

el principal aporte del estudio se evidencia en la generación de información prospectiva de ambientes glaciares, permitiendo gestionar los peligros derivados de la retracción glacial (respecto de la posible escasez del recurso hídrico), al considerar cuales son los glaciares que pueden verse afectados con mayor prontitud en el contexto de cambio climático.

6.2 CONCLUSIONES

A continuación se presenta una síntesis de los resultados obtenidos, según cada objetivo planteado:

En el primer objetivo, “Describir y sistematizar las características de los glaciares en estudio y sus variaciones areales”, se desarrolló recopilando información proveniente de publicaciones de la Dirección General de Aguas (entidad pública), por lo tanto son datos confiables.

Se obtuvo como resultado las tendencias recientes de los glaciares de la zona central, los cuales en su mayoría se encuentran en retroceso areal a excepción del glaciar El Rincón (los glaciares Volcán Peteroa, el Azufre y Marmolejo son los que tienen mayores variaciones porcentuales respecto de su área inicial); y algunas características específicas como orientación, altura, pendiente y espesor del hielo, lo que nos permitió observar algunos puntos de mayor vulnerabilidad.

También se obtiene la información actual de temperatura media anual y precipitación anual, proveniente del GCM HadGEM2-ES permitiendo clasificar los glaciares según temperatura.

En el segundo objetivo, “Estimar las trayectorias de cambios climáticos y sus efectos en los glaciares”, fue posible proyectar en dos escenarios (optimista y pesimista) las temperatura media anual y precipitación anual de cada glaciar, al año 2050, observándose la zona centro sur como sector de mayores cambios respecto de la línea base, para ambas variables. En este sentido los glaciares afectados con mayores alzas de temperaturas y disminución de precipitaciones son los Glaciares El Azufre, Cipreses, Universidad y Volcán Peteroa.

También se observa el efecto altitud como diferenciador de glaciares según tipología térmica, concentrando a mayores alturas los glaciares con menores temperaturas.

En el tercer objetivo, “Analizar la relación entre las proyecciones de cambios climáticos y las características de los glaciares en estudio”, desarrollado mediante el coeficiente de correlación de Pearson, se encontraron variables que se correlacionan linealmente entre sí, como “a menor altura mayor es la temperatura en los glaciares en todos los escenarios”, “a mayor altura menor es la precipitación en todos los escenarios”, “a mayor área mayor es el espesor” y “a mayor pendiente mayor es la de variación porcentual de

los glaciares respecto de su área inicial". Entre estas, la variable que destaca por sobre las otras variables respecto a los escenarios futuros es la altitud con respecto a las temperaturas (r de Pearson igual a -0,98).

En conclusión, es posible establecer una importante relación entre la revisión teórica del marco conceptual de este estudio y los diferentes resultados obtenidos, dado que esto, nos permite inferir la veracidad del planteamiento inicial de esta investigación, a saber, los efectos del cambio climático y su impacto casi irreversible en diversas regiones de Chile, principalmente en la zona de los glaciares.

De acuerdo con lo mencionado y en respuesta a la pregunta de investigación que busca entender; ¿Cuáles serán los posibles escenarios futuros a los que se exponen los glaciares si continúan perdiendo masa?, se establece lo siguiente:

Se comprueba lo planteado en el penúltimo informe del IPCC (2014), respecto del aumento de las temperaturas y la disminución de precipitaciones a futuro en Chile central, siendo la altitud y latitud factores determinantes sobre estos. Ello, condiciona directamente el cambio en los escenarios de los diversos glaciares estudiados, según la influencia de cada una de estas variables. Ya que, se evidencia la pérdida de masa glaciar hacia el centro sur, donde se dan condiciones para la aceleración del derretimiento de hielo, especialmente en los glaciares El Azufre y Volcán Peteroa.

Lo anterior, es concordante con gran parte de la bibliografía consultada durante la presente investigación (CECS, 2011; DGA, 2016; MMA, 2011; INE, 2016), que deja demostrada la tendencia a la reducción de la superficie glaciar a nivel generalizado en el país, producto del cambio climático, y con especial afectación en los glaciares situados en la zona central. Por lo que, se debe retomar la discusión acorde con las variaciones recientes del clima a nivel nacional, considerando la importancia de ello en la zona centro sur, integrando no sólo el estudio de la variabilidad reciente en la región, sino también, aquella de carácter antrópico y los fuertes impactos en la vulnerabilidad futura de la población y la región.

Se considera que este estudio resulta ser un aporte a la gestión eficiente del agua: primero, porque recaba información existente, lo que da cuenta del estado actual de derretimiento de los glaciares en Chile central, y segundo, porque genera escenarios prospectivos, logrando identificar la zona centro sur de Chile como un espacio en el que se propicia la vulnerabilidad de estos sistemas.

En virtud de lo expuesto, se torna fundamental fortalecer los estudios acerca de las consecuencias del cambio climático sobre los glaciares y se sugiere para estudios futuros, poner énfasis en la recopilación de más antecedentes y de evidencia concreta para una posible clasificación de vulnerabilidad glaciar, ya que son elementos necesarios a considerar dentro del ejercicio de planificar una cuenca. En este caso, se requeriría de manera imperativa el estudio *in situ*, al aplicar cualquier solución en cuencas altas, que

logren la comprensión primeramente del por qué el glaciar se encuentra en derretimiento, sin dejar espacios a interpretaciones posteriores.

Se torna indispensable para tomar acciones de prevención frente a eventos adversos, como sequías prolongadas, aumento o disminución de caudales, generación de lahares o avalanchas destructivas, etc., haciendo frente a estos eventos mediante mitigación y preparación, ya sea con embalses, recarga de acuíferos u otros mecanismos de resguardo al recurso hídrico

En este contexto, el sistema glaciar juega un rol fundamental para la mantención del recurso hídrico, ya que es parte esencial del ciclo del agua, y, como se explicó con anterioridad, actúa como reserva de agua que retiene parte de las precipitaciones.

Referente a lo anterior, se debe entender que el agua será uno de los recursos que deberá resistir a las mayores amenazas durante este siglo en Chile, no sólo por efectos del cambio climático que se torna irreversible, sino también por el gran nivel de afectación que conllevan las acciones del sistema humano, debido al excesivo consumo y a la reducción de su disponibilidad, dados los cambios que está experimentando y que probablemente seguirá experimentando el régimen de lluvias. Esto induciría una desregulación hidrológica que aumentaría la escorrentía invernal a la vez que crearía mayor riesgo de crecidas que pueden aumentar los riesgos de zonas pobladas.

En torno a lo planteado, se amplía la discusión relativa a la necesidad de integrar nuevos conocimientos con implicancias teóricas, a la vez que prácticas. Por una parte, se deben considerar los futuros riesgos que conlleva el cambio climático, lo que trae consigo futuros riesgos hídricos que también, afectarán a las economías y al bienestar de la población. Por otra parte, junto con el deterioro de nuestro territorio y la biodiversidad, es indispensable planificar y gestionar las cuencas, identificando y analizando la vulnerabilidad de los distintos sistemas. En este caso, se debe considerar el retroceso generalizado de los glaciares, dado que pone en peligro el suministro de agua, específicamente de la zona central de Chile y para esto es imprescindible inyectar recursos para continuar estudios que den cuenta de su importancia y de su contribución a la solución del problema hídrico.

BIBLIOGRAFÍA

- (CR)2. (2015). *La megasequía 2010-2015 Una lección para el futuro*. Santiago: (CR)2.
- BCN. (10 de Mayo de 2016). *Biblioteca del Congreso Nacional*. Recuperado el 10 de Diciembre de 2018, de Camara de Diputados de Chile:
<https://www.camara.cl/pdf.aspx?prmTIPO=DOCUMENTOCOMUNICACIONCUENTA&prmID=14323>
- Bernex, N., & Tejada, M. (2010). *Cambio Climático, retroceso glaciar y gestión integrada de los recursos hídricos*. Lima: Global Water Partnership.
- Bustos, E., Meza, F., & Vicuña, S. (2012). *Análisis de la vulnerabilidad futura de la Cuenca del río Choapa y estero Pupío*. Santiago: Centro Cambio Global UC.
- Caesar, J., Palin, E., & Liddicoat, S. (2013). Response of the HadGEM2 Earth System Model to Future Greenhouse Gas Emissions Pathways to the Year 2300. *Journal of Climate (JCLI)*, 3276.
- Carrasco, J., Osorio, R., & Cassasa, G. (2008). Secular trend of the equilibrium-line altitude on the western side of the southern Andes, derived from radiosonde and surface observations. *Journal of Glaciology*, 54(186), 538-550.
- Casassa, G., Apey, A., Bustamante, M., Marangunic, C., Salazar, C., & Soza, D. (2015). Contribución hídrica de glaciares en el estero Yerba Loca y su extrapolación a la cuenca del río Maipo. *XIV Congreso Geológico Chileno*, (pág. 768). La Serena.
- CECS. (2009). *Estrategia Nacional de glaciares - Fundamentos*. Santiago: DGA, MOP.
- CECS. (2011). *Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas*. Santiago: DGA - MOP.
- CEPAL & OCDE. (2016). *Evaluación del desempeño ambiental: Chile 2016*. Santiago, Chile.
- CEPAL & OCDE, 2016 en INE. (2016). *Informe Anual 2016*. Santiago: Unidad de Estadísticas del Medio Ambiente.
- CONAMA. (2006). *Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI*. Santiago: Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Coudrain, A., Francou, B., & Kundzewicz, Z. (2005). Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources. *Hydrological Sciences Journal*, 50, 925-932.
- DGA. (2004). *Cuenca Río Mataquito*. Santiago: Cade-Idepe Consultores en Ingeniería.

- DGA. (2014). *Glaciares de Chile*. Santiago.
- DGA. (2016). *Atlas del Agua Chile 2016*. Santiago: DGA.
- Edwards, P. (2010). Recuperado el 03 de Junio de 2019, de <https://doi.org/10.1002/wcc.95>
- Falvey, M., & Garreaud, R. (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*, 114.
- Ferrando, F. (Julio de 2014). *Análisis y propuesta de definición de "Glaciar"*. Recuperado el Marzo de 2019, de Camara de diputados de Chile: <https://www.camara.cl/pdf.aspx?prmID=18201&prmTIPO=DOCUMENTOCOMISION>
- GEOESTUDIOS. (2008). *Manual de glaciología*. Santiago: DGA-MOP.
- GEOESTUDIOS. (2010). *Sala Prensa: La importancia de los Glaciares de Roca*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2018, de Geoestudios: <http://www.geoestudios.cl/esp/noticias.php?tipo=69&categ=prensa>
- GEOESTUDIOS. (2011). *Catastro, exploración y estudio de glaciares de Chile Central*. Santiago: DGA - MOP.
- Haigh, M., Jansky, L., & Hellin, J. (2004). Headwater deforestation: a challenge for environmental management. *Global Environmental Change*(14), 51-61.
- INE. (2016). *Medio Ambiente: Informe Anual 2016*. Santiago: Instituto Nacional de Estadísticas - Chile.
- INE. (22 de diciembre de 2017). *El nuevo mapa de la población en Chile: Revisa los datos del Censo comuna por comuna*. Recuperado el 15 de Febrero de 2019, de Emol: <https://www.emol.com/noticias/Economia/2017/12/22/888510/El-nuevo-mapa-de-la-poblacion-en-Chile-Revisa-los-datos-del-Censo-comuna-por-comuna.html>
- IPCC. (2001). *Glossary, in CLIMATE CHANGE 2001: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge, UK: by J. McCarthy, O. Canziani, N. Leary, D. Dokken & K. White.
- IPCC. (2007). *Cambio Climático 2007: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza: Contribución de los Grupos de trabajo I,II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)].
- IPCC. (2013). *Cambio Climático 2013: Bases físicas*. GT I.
- IPCC. (2014). Afirmaciones principales del Resumen para responsables de políticas. En *Cambio Climático 2013: Base de ciencia física*. Suiza: IPCC WGI TSU.

- IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas*. GT II.
- IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al Quinto informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza: Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds).
- IPCC, 2001 en GEOESTUDIOS. (2011). *Catastro, exploración y estudio de glaciares en Chile Central*. Santiago: DGA.
- Jimenez-Cisneros, B. (2015). Seguridad hídrica: retos y respuestas, la fase VIII del programa hidrológico internacional de la UNESCO (2014-2021). *Aqua-LAC*, 7(1), 20-27.
- McPhee, J., Cortés, G., Rojas, M., García, L., Descalzi, A., & Vargas, L. (2014). Downscaling Climate Changes for Santiago: What Effects can be Expected? *Climate Adaptation Santiago*, pp 19-41.
- MMA. (2011). *Informe del Estado del Medio Ambiente 2011*. Santiago: MMA.
- MMA. (2014). *Quinto Informe Nacional de Biodiversidad de Chile ante el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CBD)*. Santiago, Chile: Ministerio de Medio Ambiente.
- Montecinos, A., & Aceituno, P. (2003). Seasonality of the ENSO-Related rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal of Climate*, 16(2), 281-296.
- Moss et. al, 2010 en IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. IPCC. Ginebra, Suiza: Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds).
- Mwendera, E. (2006). Available water for hydropower generation in Swaziland. *Physics and Chemistry of the Earth*, 952-959.
- Naciones Unidas. (1992). Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático., (pág. 3). Nueva York.
- Naruse, R., & Skvarca, P. (2000). Dynamic features of thinning and retreating Glaciar Upsala, a lacustrine calving glacier in Southern Patagonia. *Antarctic and Alpine Research*, 32(4), 485-491.
- NERC. (2013). *National Centre for Atmospheric Science*. Recuperado el 03 de Junio de 2019, de <http://cms.ncas.ac.uk/wiki/UM/Configurations/HadGEM2>
- Peña, H., & Nazarala, B. (1987). Snowmelt-runoff simulation model of a central Chile Andean basin with relevant orographic effects. Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover. *IAHS publ*, 166.

- Quintana, J. (2004). *Estudio de los factores que explican la variabilidad de la precipitación en Chile en escalas de tiempo interdecadal*. MSc. thesis, University of Chile.
- Quintero-Angel, M., Carvajal-Escobar, Y., & Aldunce, P. (2012). Adaptación a la variabilidad y el cambio climático: Intersecciones con la gestión del riesgo. *Luna Azul*, 259.
- Rignot, E., Rivera, A., & Casassa, G. (2003). Contribution of the Patagonia icefields of South America to global sea level rise. *Science*(302), 209-216.
- Rivera, A., Bown, F., Acuña, C., & Ordenes, F. (2008). Chilean glaciers as indicators of climate change. *Terra Glacialis*(11), 193-207.
- Rivera, A., Bown, F., Mella, R., Wendt, J., Casassa, G., Acuña, C., . . . Clavero, J. (2006). Ice volumetric changes on active volcanoes in Southern Chile. *Annals of Glaciology*, 43, 111-122.
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, F., Muñoz, C., & Vuille, M. (2016). *Balance de masa glaciar*. Valdivia, Chile: CECS.
- Rojas, M. (2009). *Análisis de cambios en la variabilidad e incertidumbre asociadas a las proyecciones de cambios de Temperatura y Precipitación para Chile*. Santiago: Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.
- Rutllant, J. & Fuenzalida, H. (1991) en Brown, F. (Marzo de 2004). Tesis para optar al grado de Magíster en Geografía: Cambios climáticos en la Región de Los Lagos y respuestas recientes del Glaciar Casa Pangué (41°08'S). Santiago.
- Sampieri, Fernández, & Baptista. (2006). *Metodología de la investigación*. Iztapalapa, México: MCGRAWHILLIINTERAMERICMA EDITORES, SA DE C.V.
- Santibañez, F. (2016). *El cambio climático y los recursos hídricos de Chile: La transición hacia la gestión del agua en los nuevos escenarios climáticos de Chile*. Santiago: ODEPA e INFODEP.
- Sanz, D. (13 de Noviembre de 2012). *Microbios que afectan a los glaciares*. Recuperado el 15 de 02 de 2019, de Cambio Climático: <https://climaticocambio.com/microbios-que-afectan-a-los-glaciares/>
- SERNAGEOMIN. (s/f). *Complejo Volcánico Planchón-Peteroa*. Recuperado el 15 de Junio de 2019, de Servicio Nacional de Geología y Minería: <https://www.sernageomin.cl/complejo-volcanico-planchon-peteroa/>
- Shukman, D. (11 de Mayo de 2013). *Récord histórico de bióxido de carbono en la atmósfera*. Recuperado el 13 de Junio de 2019, de BBC: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2013/05/130510_ciencia_co2_dioxido_carbo no_lav

- Urrutia, R. (28 de Marzo de 2018). *Columna de opinión: "La importancia de los glaciares en Chile"*. Recuperado el 25 de Julio de 2019, de UDEC, Universidad de Concepción : <http://www.udec.cl/panoramaweb2016/content/columna-de-opini%C3%B3n-la-importancia-de-los-glaciares-en-chile>
- Vargas, C., Sánchez, G., & Rolón, J. (14 al 18 de Octubre de 2013). *Proyecciones de cambio en la precipitación mediante vías de concentración representativas a nivel de cuenca*. Recuperado el 13 de Junio de 2018, de PINCC: http://www.pincc.unam.mx/congresonacional2013/documentos_descargables/PDF/VargasCastillejaRociodelCarmen.pdf
- Vargas, S. (1995). *Estadística descriptiva e inferencial*. Murcia: Coleccion ciencia y técnica.
- Von Storch et al., 1993 en FICLIMA. (s/f). *Descripción de la metodología de downscaling estadístico FICLIMA*. Madrid: FIC, Fundación para la investigación del Clima.
- von Storch, H., Zorita, E., & Cubasch, U. (1993). Downscaling of Global Climate Change Estimates to Regional Scales: An Application to Iberian Rainfall in Wintertime. *Journal of Climate*, 6, 1161-1171.
- Wold Almanac & Book of Facts, 2. e. (28 de Marzo de 2008). *Implicaciones del Cambio Climático Global Sobre el Flujo Turístico: Capítulo II*. Recuperado el 15 de Abril de 2019, de Bibliotecas UDLAP: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lhr/bahena_z_m/capitulo2.pdf