



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DEL RETROCESO GLACIAR Y SU INFLUENCIA EN LA  
DISPONIBILIDAD DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA DEL RÍO  
OLIVARES, PROVINCIA CORDILLERA, CHILE**

**MEMORIA PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**JULIO ANDRÉS ESTEBAN MATURANA FRANÇA**

**PROFESOR GUÍA:  
XIMENA VARGAS MESA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JAMES MCPHEE TORRES  
MIGUEL ÁNGEL LAGOS ZÚÑIGA**

**SANTIGO DE CHILE  
JULIO 2015**

## Resumen

Uno de los grandes problemas relacionados al recurso hídrico es su disponibilidad a futuro. En ese marco, las reservas glaciares pueden jugar un papel fundamental. Más allá de la retórica de que los glaciares son las reservas del futuro, es necesario cuantificar qué parte del escurrimiento actual corresponde a la descarga de los glaciares y como esto podría cambiar hacia el futuro bajo escenarios inminentes de cambios climáticos. Este trabajo de título consiste en realizar un análisis del retroceso glaciar y la influencia que tiene en la cuenca del río Olivares ubicada en la provincia Cordillera, Chile. Los Glaciares de la zona de estudio corresponden a Olivares Alfa, Beta, Gamma y Juncal Sur, que desde la segunda mitad del siglo pasado hasta ahora, han presentado un retroceso considerable en su superficie. Además de los glaciares nombrados, se estudiaron de manera general los glaciares aledaños que presentan descarga hacia la cuenca y los glaciares de menor tamaño que representan parte del flujo.

El objetivo general de este trabajo es estimar la variabilidad de los recursos hídricos en la cuenca Olivares y los posibles alcances que tiene sobre la hidrología del sector el retroceso de los glaciares. Para ello se realizó un estudio de las variables que inciden en el retroceso glaciar, para determinar en el tiempo la evolución de estos.

Una vez determinadas las características de la zona de estudio y el comportamiento de los glaciares, se determinaron los parámetros de la descarga glaciar y de la cuenca, que permitieron generar un modelo de escurrimiento para un periodo anual y para un periodo de seis meses comprendido entre octubre y marzo que corresponde al "Periodo de deshielo" debido a la ausencia casi total de precipitación en esa época. Una vez realizada la calibración y validación del modelo se realiza una proyección del escurrimiento entre los años 2040-2070 considerando el retroceso glaciar y los escenarios extremos de cambio climático, RPC2.6 y RPC8.5 (IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis, 2013).

Las proyecciones indican que hacia el año 2040 existirá una disminución del caudal cercano a 0.5 m<sup>3</sup>/s promedio anual producto del retroceso glaciar y cambio climático. Hacia el año 2070 la disminución será de hasta 3.5 m<sup>3</sup>/s dependiendo del escenario utilizado. En el caso del periodo de deshielo, la cifra puede superar los 5 m<sup>3</sup>/s. Para el escenario RPC8.5, producto de un retroceso glaciar más acelerado, la disponibilidad de caudales aumentará durante los próximos años, para posteriormente tener una disminución mucho más fuerte que el escenario RPC2.6, lo que hará que en el largo plazo el escenario RCP2.6 sea mucho más sustentable, aunque en el corto plazo cuente con menores caudales para los próximos años. El estudio indica que para los años extremadamente secos el retroceso glaciar podría generar aportes de caudal de hasta 90% del caudal total del periodo de deshielo (como promedio) en un escenario RCP8.5, mientras que en años normales, en condiciones actuales, representa cerca de 12%. Para el escenario RCP2.6 en el periodo de deshielo el aporte glaciar es cercano al 20%. Ante una eventual desaparición de los glaciares o una reducción considerable de su volumen para finales del siglo el caudal del río Olivares bajaría considerablemente; Para el escenario RCP8.5 el caudal disminuiría cerca de un 41% del caudal promedio de la serie histórica.

*"Não basta que seja justa e pura a nossa causa.  
É necessário que a pureza e a justiça existam dentro de nós  
**Agostinho Neto**"*

## Agradecimientos

El camino sin duda ha sido largo, a ratos tedioso y otras veces lleno de alegrías y buenos recuerdos. No solo se puede recordar el proceso de memoria en estas palabras, es el proceso completo el que se recuerda, más que más, esta es la gota que rebasa el vaso ante un destino inevitable, y es que después de tantos años, ya era el momento.

Es imposible irse sin agradecer a quienes acompañaron este camino, pero más imposible es nombrarlos a todos. Inevitable es que muchos solo lean los agradecimientos esperando ver sus iniciales, pero si no están, deben saber que quienes se lo merecen están en un sitio mucho mayor.

En lo académico he de agradecer a mi profesora guía Ximena Vargas, a mi profesor co guía James McPhee y al profesor integrante Miguel Lagos, por la revisión y la disponibilidad cuando fue necesario. A los profesores en general que tuve en todo este proceso académico, en especial a quienes pertenecen a la División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente del Departamento de Ingeniería Civil.

Agradezco a esa juventud que me hizo aprehensor de preciados recuerdos durante tantos años de política universitaria y tantas tertulias de infinitas banalidades y fórmulas incoherentes para salvar un mundo que aún no conocíamos. A esa juventud que me enseñó que la justicia es una sola y que debemos perseguirla en todo nuestro quehacer profesional, pues como hijos de Bello debemos ser íntegros, solidarios y luchar por el que no tiene, para crear una sociedad mejor, más justa y equitativa.

Agradezco a esos compadres que llevan más de 20 años en mi vida y todavía siguen alegrando inesperadas noches de juerga desde los tiempos de la cotona. Tampoco puedo dejar afuera a ese extraño y diverso grupo que se transformó en el sentimiento estacional y que a cada año espera, a pesar de las vicisitudes, un nuevo verano naranja. Agradecer también a quienes conocí en la Universidad, a quienes se transformaron en un mundo por sí solos, con quienes hicimos trabajos o con los que solo nos encontrábamos en esa terraza con aires de zona franca, a los que me acompañaron en momentos difíciles y a ese inolvidable "CEPC", que hasta el día de hoy me acompaña y en especial a esa jovencita que aun saluda con la mano sin perder ni un gajo de ideales.

Le agradezco también a mi familia que me ayudó a llegar a un pedestal que me permitió avanzar y llegar hasta acá. Finalmente, te agradezco a ti, mi compañera, mi vida, mi cielo, Francisca, que me hiciste creer que lo imposible si era posible.

# Tabla de Contenido

1.	Introducción .....	1
1.1	Antecedentes .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Organización del informe .....	3
2.	Revisión bibliográfica .....	4
2.1	Generalidades .....	4
2.2	Clasificación de los glaciares .....	5
2.3	Cambio climático.....	7
2.4	Balance hidrológico glaciar .....	9
2.5	Metodología .....	11
2.5.1	Análisis de la revisión bibliográfica .....	11
2.5.2	Estudio de las variables que inciden en el retroceso glaciar.....	11
2.5.3	Análisis según periodo de deshielo y periodo anual.....	11
2.5.4	Calibración del modelo.....	12
2.5.5	Impacto hidrológico del retroceso glaciar.....	12
3.	Zona de estudio.....	13
3.1	Ubicación.....	13
3.2	Características morfológicas .....	15
3.3	Características geológicas .....	16
3.4	Clima y meteorología .....	17
3.5	Hidrología .....	17
3.6	Flora y Fauna .....	19
4.	Información disponible y parámetros.....	20
4.1	Variables Hidrológicas.....	20
4.1.1	Sublimación .....	20
4.1.2	Evaporación.....	21
4.2	Caudales .....	22
4.3	Información glaciar.....	25
4.3.1	Tasa Anual de Pérdida de área glaciar Y .....	26
4.3.2	Volumen Glaciar .....	35

4.4	Precipitaciones y nieve.....	36
4.4.1	Precipitación.....	36
4.4.2	Nieve.....	40
4.5	El Modelo y sus parámetros.....	41
4.6	Cambio climático y escenarios del retroceso glaciar .....	45
4.6.1	Temperatura.....	46
4.6.2	Tasa retroceso .....	46
4.6.3	Precipitación.....	47
5.	Calibración y validación del modelo.....	48
5.1	Datos a utilizar.....	48
5.2	Simulación en bruto (sin calibración).....	48
5.2.1	Periodo Anual .....	48
5.2.2	Periodo de deshielo.....	51
5.3	Análisis de sensibilidad.....	54
5.4	Elecciones de parámetros .....	55
5.4.1	Porción no sublimada de la ablación anual.....	56
5.4.2	Porción no sublimada de la ablación del periodo de deshielo.....	56
5.4.3	Evaporación en el área sin cobertura glaciar anual .....	56
5.4.4	Evaporación en el área sin cobertura glaciar en el periodo de deshielo .....	56
5.4.5	Precipitación Periodo anual .....	57
5.4.6	Precipitación periodo de deshielo.....	60
5.5	Resultados de la calibración y Validación .....	62
5.5.1	Periodo Anual .....	62
5.5.2	Periodo de deshielo.....	63
6.	Análisis y resultados.....	66
6.1	Resultados principales.....	66
6.2	Escenarios futuros y cambio climático .....	70
6.2.1	Periodo anual .....	70
6.2.2	Periodo de deshielo.....	83
7.	Conclusiones.....	94
7.1	Periodo anual .....	95
7.2	Periodo de deshielo.....	96

7.3 Aspectos principales del modelo .....	97
Bibliografía .....	99
8. ANEXOS .....	103

## Anexos

Anexo I Evaporación.....	104
Anexo II Precipitaciones .....	113
Anexo III Caudal de la cuenca Olivares en régimen natural.....	127
Anexo IV Campaña de terreno .....	132
Anexo V Muestras de calidad de aguas en efluentes glaciares.....	147
Anexo VI Series de precipitaciones Cambio Climático .....	155

## Índice de figuras

Figura 2-1: Caudales medios mensuales cuenca rio olivares 2004-2013.....	4
Figura 2-2: Disminución de la masa global glaciar en los últimos 30 años. (WGMS, 2012).....	5
Figura 2-3: Glaciar Los Exploradores, XI Región, Chile, 2014. ....	7
Figura 2-4 Glaciares Piedmont al sur de Axel Heiberg Island. Ártico Canadiense. Aerial foto J. Alean, 1977. (Alean & Hambrey, 2006).....	7
Figura 2-5: Cambio de temperatura global para distintos escenarios (IPCC, 2013). ....	8
Figura 2-6: Cambios de temperatura para la zona central de Chile bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 (Rojas, 2012) .....	9
Figura 2-7: Cambios en la precipitación para la zona central de Chile bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 (Rojas, 2012). ....	9
Figura 2-8: Fases “típicas” del impacto hidrológico del retroceso glaciar .....	11
Figura 3-1 Vista general de la Región Metropolitana y la Cuenca Olivares. ....	13
Figura 3-2 Cuenca del Río Olivares aislada de la region.....	14
Figura 3-3 Glaciares en la Cuenca del Río Olivares (CECS, 2013) .....	15
Figura 3-4 Mapa de alturas de la cuenca del Río Olivares en msnm. ....	15
Figura 3-5 Mapa de altitudes en 3d de la cuenca del Río Olivares .....	16
Figura 3-6 Mapa geológico de la cuenca del Río Olivares (SERNAGEOMIN, 2014).....	17
Figura 3-7 Río Olivares en la Cuenca Olivares en coordenadas 394264 E, 6293308 S H19(salida). .	18
Figura 3-8 Líneas de escurrimiento del Río Olivares .....	19
Figura 4-1 Tendencia de caudales en periodo de deshielo y promedio Anual .....	24
Figura 4-2 Tendencia de caudales en periodo de deshielo y promedio Anual con corrección de escurrimiento inusual.....	24
Figura 4-3 Reducción del área Glaciar en la Cuenca del río Olivares entre los años 1955 y 2013....	26

Figura 4-4 Tendencia logarítmica de la TAPAG para el conjunto de glaciares entre los años 1955 y 2013.....	28
Figura 4-5 Tendencia exponencial de la TAPAG para el conjunto de glaciares entre los años 1966 y 2013.....	29
Figura 4-6 Tendencia exponencial <sup>2</sup> de la TAPAG para el conjunto de glaciares entre los años 1966 y 2013.....	29
Figura 4-7 Tendencia lineal de la TAPAG para el conjunto de glaciares entre los años 1991 y 2013.....	30
Figura 4-8 Proyección de derretimiento del Área glaciar bajo distintos métodos hasta el año 2200.....	32
Figura 4-9 TAPAG entre los años 1955 y 2013 para los glaciares de la cuenca Olivares. ....	33
Figura 4-10 TAPAG entre los años 1991 y 2013 para los glaciares de la cuenca Olivares. ....	34
Figura 4-11 Ubicación de estaciones pluviométricas cercanas para estudiar la cuenca Olivares ....	36
Figura 4-12 Simulación de precipitación para la estación virtual Olivares. Simulación en Base a estaciones Maitenes y Yeso y promedio de ambas simulaciones. ....	39
Figura 4-13 Representación de las etapas acumulación-derretimiento. ....	40
Figura 4-18 Esquema del balance hídrico del modelo de la cuenca.....	41
Figura 5-1 Caudales simulados sin calibración versus el caudal observado de la cuenca para el periodo 1991-2014.....	51
Figura 5-2 Caudales simulados sin calibración versus el caudal observado de la cuenca para el periodo de deshielo entre los años 1991-2014.....	54
Figura 5-3 Diagrama de flujo condicional para la elección de los valores de precipitación para contribución de caudal en la Cuenca Olivares para un periodo anual.....	59
Figura 5-4 Diagrama de flujo condicional para la elección de los valores de precipitación para contribución de caudal en la Cuenca Olivares en el periodo de deshielo. ....	61
Figura 6-1 Resultados de simulación de caudales en la cuenca Olivares en periodo Anual.....	67
Figura 6-2 Correlación entre los caudales observados y simulados Cuenca Olivares.....	68
Figura 6-3 Resultados de simulación de caudales en la cuenca Olivares en periodo de deshielo....	69
Figura 6-4 Correlación entre los caudales observados y simulados cuenca olivares para el periodo de deshielo. ....	70
Figura 6-5 Caudales de los casos r1 a r3 para escenario RCP2.6 entre el 2040 y el 2070.....	71
Figura 6-6 Caudales de los casos r1 a r3 para escenario RCP8.5 entre el 2040 y el 2070.....	72
Figura 6-7 Caudales para el caso r1 en los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 entre el 2040 y el 2070.....	72
Figura 6-8 Diferencia de caudal en l/s entre escenarios RCP2.6 y RCP 8.5 para el caso r1.....	73
Figura 6-9 Proyección del aporte glaciar para los escenarios RCP2.6 y RCP 8.5 en el periodo anual.....	74
Figura 6-10 Proyección de caudales caso r1 para el escenario RCP2.6 con y sin aporte glaciar.....	76
Figura 6-11 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r1 en el escenario RCP2.6.....	77
Figura 6-12 Proyección de caudales caso r2 para el escenario RCP2.6 con y sin aporte glaciar.....	77
Figura 6-13 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r2 en el escenario RCP2.6.....	78

Figura 6-14 Proyección de caudales caso r3 para el escenario RCP2.6 con y sin aporte glaciar .....	78
Figura 6-15 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r3 en el escenario RCP2.6 .....	79
Figura 6-16 Proyección de caudales caso r1 para el escenario RCP8.5 con y sin aporte glaciar .....	80
Figura 6-17 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r1 en el escenario RCP8.5 .....	80
Figura 6-18 Proyección de caudales caso r2 para el escenario RCP8.5 con y sin aporte glaciar .....	81
Figura 6-19 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r2 en el escenario RCP8.5 .....	81
Figura 6-20 Proyección de caudales caso r3 para el escenario RCP8.5 con y sin aporte glaciar .....	82
Figura 6-21 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r3 en el escenario RCP8.5 .....	82
Figura 6-22 Caudales de los casos r1 a r3 para escenario RCP2.6 entre el 2040 y el 2070 para el periodo de deshielo .....	83
Figura 6-23 Caudales de los casos r1 a r3 para escenario RCP8.5 entre el 2040 y el 2070 para el periodo de deshielo .....	83
Figura 6-24 Caudales para el caso r1 en los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 entre el 2040 y el 2070...	84
Figura 6-25 Diferencia de caudal en l/s entre escenarios RCP2.6 y RCP 8.5 para el caso r1 en el periodo de deshielo .....	84
Figura 6-26 Proyección del aporte glaciar para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 en el periodo de deshielo.....	85
Figura 6-27 Proyección de caudales caso r1 para el escenario RCP2.6 con y sin aporte glaciar en el periodo de deshielo .....	87
Figura 6-28 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r1 en el escenario RCP2.6 en el periodo de deshielo .....	88
Figura 6-29 Proyección de caudales caso r2 para el escenario RCP2.6 con y sin aporte glaciar en el periodo de deshielo .....	88
Figura 6-30 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r2 en el escenario RCP2.6 en el periodo de deshielo .....	89
Figura 6-31 Proyección de caudales caso r3 para el escenario RCP2.6 con y sin aporte glaciar en el periodo de deshielo .....	89
Figura 6-32 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r3 en el escenario RCP2.6 en el periodo de deshielo .....	90
Figura 6-33 Proyección de caudales caso r1 para el escenario RCP8.5 con y sin aporte glaciar en el periodo de deshielo .....	91
Figura 6-34 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r1 en el escenario RCP8.5 en el periodo de deshielo .....	91
Figura 6-35 Proyección de caudales caso r2 para el escenario RCP8.5 con y sin aporte glaciar en el periodo de deshielo .....	92
Figura 6-36 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r2 en el escenario RCP8.5 en el periodo de deshielo .....	92

Figura 6-37 Proyección de caudales caso r3 para el escenario RCP8.5 con y sin aporte glaciar en el periodo de deshielo .....	93
Figura 6-38 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r3 en el escenario RCP8.5 en el periodo de deshielo .....	93
Figura 7-1 Caudales producto de la pérdida de volumen a causa del retroceso glaciar en varios escenarios en el periodo anual .....	95
Figura 7-2 Caudales producto de la pérdida de volumen a causa del retroceso glaciar en varios escenarios en el periodo de deshielo.....	96
Figura 8-1 Relación de altura y presión atmosférica.....	109
Figura 8-2 Evaporación en la Estación Valle Olivares. Mayo- octubre.....	110
Figura 8-3 Evaporación en la Estación Yerba Loca en un periodo de un año. ....	110
Figura 8-4 Evaporación en la Estación Yerba loca en un periodo de un año para tres métodos ...	111
Figura 8-5 Curva de duración de precipitación anual en estación DGA.....	117
Figura 8-6 Comparación entre simulación y precipitación observada de cada Año hidrológico entre 1991 y 2014 estación Maitenes .....	119
Figura 8-7 Curva de Duración de la precipitación anual en estación Maitenes.....	119
Figura 8-8 Comparación entre simulación y real de la precipitación de cada Año hidrológico entre 1991 y 2014 estación el Yeso .....	121
Figura 8-9 Curva de Duración de la precipitación anual en estación El Yeso.....	121
Figura 8-10 Curvas de nivel de la cuenca Olivares .....	122
Figura 8-11 Curva de nivel 2500 msnm cuenca Olivares .....	123
Figura 8-12 Área bajo los 2500 msnm de la cuenca olivares .....	124
Figura 8-13 Serie corregida de la estadística de la Estación Olivares entre los años 1991-2013 versus Serie natural de la Estación Olivares entre los años 1962-1983.....	131

## Índice de tablas

Tabla 4-1 Porcentajes de sublimación para los Glaciares de la Cuenca del Río Olivares.....	21
Tabla 4-2 Promedio anual y del periodo de deshielo de la sublimación .....	21
Tabla 4-3 Evaporación Anual y diaria para la cuenca del Río Olivares.....	22
Tabla 4-4 Estación fluviométrica Río Olivares antes de la Junta con el Río Colorado .....	22
Tabla 4-5 Promedio periodo de deshielo y Promedio Anual de caudales de la estación Río Olivares en m <sup>3</sup> /s .....	23
Tabla 4-6 Áreas de los glaciares de la zona de interés en Km <sup>2</sup> entre los años 1955 y 2013 .....	25
Tabla 4-7 Área glaciar en la Cuenca del río Olivares no perteneciente a la zona Olivares y Juncal..	25
Tabla 4-8 Proyección de área glaciar (km <sup>2</sup> ) según distintos métodos entre el 2013 y el 2170 Escenario 1 .....	30
Tabla 4-9 Proyección de área glaciar según distintos métodos entre el 2013 y el 2170 Escenario 2 .....	35
Tabla 4-10 Datos pluviométricos anuales en milímetros corregidos para las estaciones del caso de estudio.....	37

Tabla 4-11 Resultados simulación de estación Olivares en base a estación Maitenes y El Yeso.....	38
Tabla 5-1 Caudales simulados sin calibración versus el caudal observado de la cuenca para el periodo 1991-2014.....	49
Tabla 5-2 Relación porcentual entre caudales no calibrados y caudal promedio anual observado para el periodo 1991-2014.....	50
Tabla 5-3 Caudales simulados sin calibración versus el caudal observado de la cuenca para el periodo de deshielo entre los años 1991-2014 .....	52
Tabla 5-4 Relación porcentual entre caudales no calibrados y caudal observado para el periodo 1991-2014 en el periodo de deshielo .....	53
Tabla 5-5 Calibración de la cuenca Olivares entre años hidrológicos 1991 a 2009 .....	62
Tabla 5-6 Valores del modelo para cuenca Olivares entre los años hidrológicos 2009 a 2014 .....	63
Tabla 5-7 Calibración de la cuenca Olivares en el periodo de deshielo entre años hidrológicos 1991 a 2009.....	64
Tabla 5-8 Valores de la validación para cuenca Olivares en el periodo de deshielo entre los años hidrológicos 2009 a 2014 .....	64
Tabla 6-1 Porcentaje de caudal del caudal total producto del retroceso glaciar en la cuenca Olivares.....	75
Tabla 6-2 Porcentaje de caudal del caudal total producto del retroceso glaciar en la cuenca Olivares para el periodo de deshielo, serie histórica .....	86
Tabla 8-1 Estaciones Meteorológicas para el cálculo de la evaporación .....	107
Tabla 8-2 Resultados de evaporación (mm/día) para las estaciones meteorológicas VO y YL bajo diferentes métodos.....	111
Tabla 8-3 Evaporación (mm/día) en la Estación valle Olivares bajo diferentes métodos.....	111
Tabla 8-4 Evaporación Anual y diaria para la cuenca del Río Olivares.....	112
Tabla 8-5 Estadística disponible para las estaciones Pluviométricas del estudio .....	114
Tabla 8-6 Resultados simulación de estación Maitenes en base a estación DGA .....	118
Tabla 8-7 Resultados simulación de estación El Yeso en base a estación Maitenes .....	120
Tabla 8-8 Relación porcentual de precipitación caída en el periodo abril-septiembre versus octubre-marzo.....	125
Tabla 8-10 Generación Bruta Central Alfalfal entre los años 1991-2013 en MWh.....	129
Tabla 8-11 Estadísticas de la estación Olivares para un periodo natural y otro corregido.....	131

# 1. Introducción

## 1.1 Antecedentes

El estudio de glaciares y su comportamiento hidrológico no es un tema nuevo en Chile, pero a pesar de que existen mediciones desde hace más de medio siglo aún falta gran parte del territorio por estudiar en profundidad. La cantidad de datos (mediciones in situ de retroceso glaciar) a lo largo de la cordillera son escasos, lo que genera un campo abierto en el área para realizar nuevos estudios y estimaciones para escenarios futuros. En el marco de la cuenca del río Olivares, los glaciares descubiertos de la alta cordillera se encuentran en una zona estratégica de la Región Metropolitana, debido a que a solo kilómetros de estos, se desarrollan proyectos mineros, siendo uno de ellos de suma importancia para este estudio. La división Andina de Codelco, tiene en carpeta su proyecto de expansión más importante desde los inicios de la explotación en la alta cordillera, por lo que es necesario realizar una serie de estudios para estimar el manejo de los recursos hídricos, los límites ambientales y de disponibilidad del sector. Es en este marco que se hace necesario estudiar la influencia del retroceso glaciar sobre el régimen hidrológico de los caudales de las cuencas. Es importante destacar que los proyectos de División Andina de Codelco (DAND), no se centran en esta cuenca.

Estudios previos realizados en la Cordillera Blanca en Perú (Baraer et al., 2012), estimaron la influencia del retroceso glaciar sobre los recursos hídricos en cuencas tropicales, identificando puntos de transición críticos en donde se exhibió un declive en la descarga de la estación seca y se estimó una reducción de hasta un 30% de la descarga una vez que los glaciares desaparecieran completamente. Si bien es cierto este estudio es bastante completo, carece fundamentalmente de una adaptación a otras condiciones climáticas, por lo que se hace necesario generar un modelo que tenga una aplicación local, basado en estudios realizados en el país que contengan estimaciones de variabilidad glaciar en la zona. Se ha estudiado la variación glaciar en la cuenca del Aconcagua (Bown et al., 2008), lo que permitiría tener una serie de datos para estimar la influencia en las cuencas aledañas de los glaciares pertenecientes a la misma zona. Codelco Andina, en los últimos años, ha realizado una serie de estudios, que incluyen balance de masa y balance energético, entre otros estudios, en los glaciares descubiertos cercanos a las operaciones mineras, conocidos como Olivares Alfa, Olivares Beta, Olivares Gamma, Juncal Sur, Juncal Norte (CECS, 2013), en donde se ha podido comprobar que el retroceso glaciar es parte de una realidad, al contrastar los datos de fotografías aéreas desde 1950 hasta los actuales (DGA, 2011). En el plano internacional, el retroceso glaciar se ha estado monitoreando constantemente por varias instituciones, entre ellas el World Glacier Monitoring Service (WGMS) que tiene informes de las fluctuaciones de varios glaciares de referencia desde los años 60 hasta la actualidad. En el plano nacional, además de los estudios realizados por la DGA en varios glaciares (en donde se destaca el Glaciar Echaurren en la zona central, el glaciar San Rafael en la zona sur y la estrategia nacional de glaciares, entre otros), existen varios estudios de glaciólogos nacionales, como por ejemplo “variaciones recientes de glaciares en Chile” (Rivera et al., 2000), “Recent glacier variations at the

Aconcagua basin” (Bown et al., 2008), entre otros. La importancia de los glaciares Olivares, es que representan un factor fundamental para la estimación del recurso hídrico en la cuenca, el estado actual de los glaciares de la zona no es homogéneo, mientras algunos tienen una tasa de retroceso bastante alta, otros se encuentran más estables, pero aun así todos retrocediendo (CECS, 2013).

La estimación del recurso hídrico para la cuenca Olivares es fundamental para proyecciones futuras, tanto para la producción minera como para la población que utiliza el recurso para diversas actividades, por lo que es necesario generar investigación en torno al balance hidrológico de todo un sistema incluyendo los glaciares.

Son varias las interrogantes que surgen a raíz del trabajo en glaciares y estas radican principalmente en los factores incidentes en el retroceso glaciar. Una vez que se asume que el retroceso glaciar es continuo y pareciera no tener freno, cabe preguntarse ¿Quién es el culpable? Si bien es cierto, no es la pregunta que se responderá en este trabajo, es posible que se den algunas luces respecto a la aceleración del retroceso en los últimos años producto del cambio climático, pero llegar a determinar si existen otros factores exógenos, requiere de un estudio más acabado de las características de cada macizo rocoso, su ubicación, orientación y cuales podrían a llegar esos factores (como el polvo), en cuanta medida y por cuanto tiempo de exposición.

Conocer cuál es la cantidad de recursos naturales que posee el país y en específico la disponibilidad de recursos hídricos, no solo es una materia importante para una determinada zona, sino que es parte del desarrollo estratégico de una región. La cuenca del Río Olivares es una de las aportantes al caudal del Río Maipo, si bien es cierto, el río Olivares primero confluye con el río Colorado, se debe obtener una proyección porcentual de la disponibilidad total en la cuenca que abastece a la Región Metropolitana.

La elección de variables solo hasta el año 2050 y no hasta el 2100, que es hacia donde apuntan todos los estudios de cambio climático, no fue una elección al azar y tiene que ver con la disponibilidad real que se tiene de nuestros recursos hídricos. Se sabe que es una fuente agotable, pero no cuándo se agotará.

Es por esto que de acá en adelante se describen los pasos necesarios a seguir para concretar el trabajo final que pueda dar con las respuestas a las interrogantes que se han planteado.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo principal de este trabajo es determinar la variación de los recursos hídricos, en la cuenca de régimen nivo-glacial del río Olivares producto del retroceso glaciar hacia el año 2050 y analizar estas tendencias futuras. Para esto se deben cumplir una serie de objetivos específicos:

- Analizar los datos de retroceso de los glaciares en la cuenca del río Olivares en los últimos años para determinar su influencia en la variabilidad hidrológica en el mediano plazo

- Determinar la productividad actual y futura de los glaciares en la zona (caudal específico)
- Determinar la influencia de la precipitación en la frecuencia de la descarga de los glaciares Olivares y Juncal Sur

### **1.3 Organización del informe**

El capítulo 2 hace referencia a la revisión bibliográfica, donde se describe la clasificación de glaciares, se entrega una breve descripción de las características de la cuenca, los estudios previos y los modelos utilizados en experiencias similares.

El capítulo 3 da una descripción más en profundidad de las características de la cuenca y de los glaciares de la zona, pasando por las características meteorológicas, de suelo e hídricas.

El capítulo 4 resume la información disponible y se presenta una revisión crítica para la obtención de los parámetros del modelo de la cuenca.

El capítulo 5 consta de la calibración y validación del modelo hidroglaciológico.

El capítulo 6 presenta los resultados y análisis de la modelación de distintos escenarios.

Finalmente, el capítulo 7 contiene las conclusiones del trabajo.

## 2. Revisión bibliográfica

### 2.1 Generalidades

La cuenca del río Olivares en la Región Metropolitana corresponde a una cuenca de régimen hidrológico nivo-glaciar, esto es apoyado por las tendencias en los caudales. Una cuenca de este tipo significa que sus recursos hídricos vienen en mayor proporción de la nieve y del hielo glaciar, una vez que estos pasan de estado sólido a líquido. Dado el régimen estacional que se tiene en la región, los mayores caudales se dan en el periodo primavera-verano, producto del alza de la temperatura y radiación. Al revisar los antecedentes de los últimos 10 años se puede confirmar esta hipótesis. (Figura 2-1)

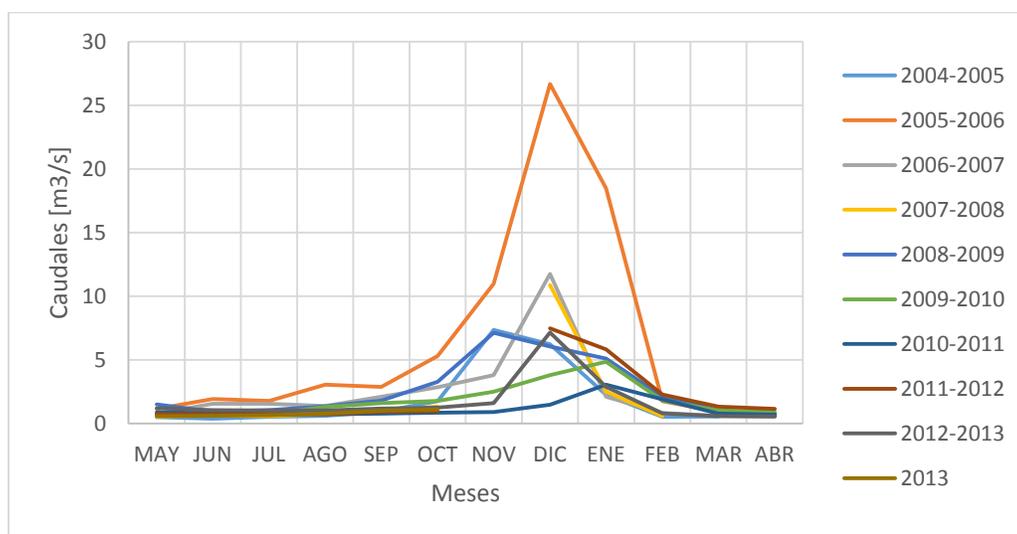


Figura 2-1: Caudales medios mensuales cuenca rio olivares 2004-2013.

En la cuenca existen un total de 148 glaciares (CECS, 2013), de los cuales cuatro serán estudiados, correspondientes a Olivares Alfa, Olivares Beta, Olivares Gamma y Juncal Sur. Cada uno de estos ha experimentado una reducción en su área desde 1955 (data de los primeros registros aéreos) hasta la fecha. Es importante considerar que no es posible estimar de forma directa la relación entre esta reducción con el volumen total, dado que en muchos de los registros se desconoce la profundidad de estos glaciares. Es de suma importancia estimar las variables que dan origen al caudal de tal forma de poder separar las componentes e identificar lo correspondiente a deshielo glaciar y finalmente estimar la proyección de escorrentía para un mediano plazo (2050) considerando una disminución continua de la masa glaciar (Figura 2-2).

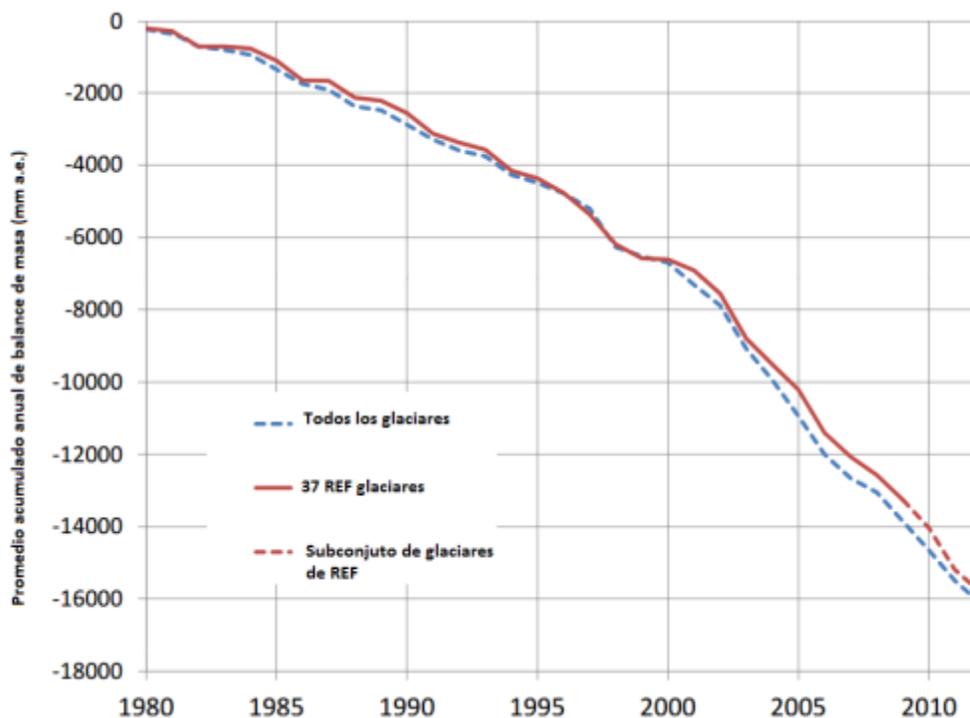


Figura 2-2: Disminución de la masa global glaciar en los últimos 30 años. (WGMS, 2012).

La Figura 2-2 muestra como la disminución en milímetros de agua equivalente ha sido constante en el tiempo para mediciones en 37 glaciares (WGMS, 2012) y ha tenido una correlación en todos los glaciares monitoreados del mundo, en los cuales se incluyen varios en territorio chileno, lo que permite hacer una estimación de la disminución de volúmenes en el tiempo.

## 2.2 Clasificación de los glaciares

Los glaciares tienen múltiples definiciones dada su naturaleza heterogénea, y su forma depende tanto de su ubicación local como regional. Este trabajo se centra principalmente en el estudio de 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 con más referencias en el tema y también la más general por no hacer muchas diferencias entre glaciares es la siguiente:

*“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”* (Liboutry, 1956).

Existen otras definiciones como la dada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)), que dan una visión más amplia de un glaciar:

*“Masa de hielo que fluye hacia abajo (por deformación interna y deslizamiento de la base) limitada por la topografía que le rodea (por ejemplo, las laderas de un valle o picos alrededor); la topografía de la base rocosa es la principal influencia sobre la dinámica y la pendiente de superficie de un*

*glaciar. Un glaciar se mantiene por la acumulación de nieve en altitudes altas, y se equilibra por la fusión de nieve en altitudes bajas o la descarga en el mar” (IPCC, 2001).*

Hasta la fecha las definiciones aceptadas por gran parte de la comunidad científica para las diferentes formas de glaciares, ya sea por su dimensión o composición, son las que se definen en la estrategia nacional de glaciares (DGA, 2009). En las definiciones clasificadas por su morfología primaria se tiene: Casquetes de hielo continental, Plataformas de hielo flotantes, Corrientes de hielo, Glaciares de Piedmont, Glaciares de valle, Glaciares en Calota, Campos de Hielo, Glaciares de cráter, Glaciares de montaña, Glaciares de Circo, Glaciaretos y Glaciares rocosos.

Existe también una serie de clasificaciones, por tipos de zonas de acumulación, tipos de frentes, clasificación térmica y por su dinamismo. Fuera del plano académico se define glaciar de una manera operativa, por la estrategia nacional de glaciares, que deja afuera a varios tipos de glaciar reconocidos por la academia, pero dependiendo del ámbito en que se necesite aplicar puede ser o no válida. Esta definición es:

*“Toda superficie de hielo y nieve permanente generada sobre suelo, que sea visible por períodos de al menos 2 años y de un área igual o superior a 0,01 km<sup>2</sup> (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.” (DGA, 2009).*

Otra de las definiciones usadas a nivel internacional es la indicada por uno de los glosarios más completos en el tema de glaciares que fue realizado por la Unesco y la asociación internacional de las ciencias de la criósfera:

*“Una masa perenne de hielo, y posiblemente nieve, que se origina en la superficie de la tierra por la recristalización de nieve u otras formas de precipitación sólida y muestra evidencias de flujo pasado o presente” (UNESCO, 2011)*

A pesar de las diferentes definiciones puede llegar a ser difícil clasificar un glaciar sin una vista panorámica o en altura de la zona, o al considerar las posiciones que ocupó en el pasado, ya que esto último podría dejarlo en un término medio entre dos definiciones. En Chile existen varios glaciares accesibles mediante caminatas o trekking y que con la ayuda de un mapa cartográfico se pueden identificar. Esto último es el caso del Glaciar Los Exploradores (Figura 2-3), ubicado en la región de Aysén al inicio del Campo de Hielo Norte, que por su forma puede ser identificado como un glaciar de valle, pero por ser un glaciar que pertenece a los campos de hielo podría ser rotulado como “campo de hielo” según la definición que se adopte.



*Figura 2-3: Glaciar Los Exploradores, XI Región, Chile, 2014.*

Otro tipo de glaciares, poco comunes en Chile Central, son los glaciares de Piedmont que se aprecian en la Figura 2-4



*Figura 2-4 Glaciares Piedmont al sur de Axel Heiberg Island. Ártico Canadiense. Aerial foto J. Alean, 1977. (Alean & Hambrey, 2006)*

### **2.3 Cambio climático**

Para este trabajo se analizarán ciertos escenarios de cambio climáticos, para ver cómo este afectará el retroceso glaciar y por consecuencia, cuáles son los efectos sobre el caudal del Río Olivares. Se asume, entonces, que existe un cambio climático y este afectará factores importantes que afectan al retroceso glaciar como la precipitación y la temperatura (Garreaud, 2011).

Existen 4 escenarios planteados por el IPCC: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5. El primero se plantea en la opción de que la población mundial va a emitir menos gases de efecto invernadero muy pronto, vale decir, dentro de los próximos 10 años; el segundo plantea una reducción no tan pronto pero si antes del 2050; el tercer escenario asume que recién después de dos generaciones se empezarán a tomar decisiones con respecto a la disminución de emisiones; finalmente, el último escenario plantea que no existirá ningún cambio respecto al comportamiento humano y la emisión de gases de efecto invernadero. Dado ruido (gran dispersión de datos) que contienen los estudios y análisis de escenarios, en este informe se analizaran solo los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5.

Respecto a los escenarios, existen referencias tanto para el análisis global como para el análisis más regional. Dentro del análisis global el IPCC hace una serie de estimaciones para la temperatura, la precipitación, el viento y las emisiones de gases. Dentro de lo que respecta a la temperatura, existen modelamientos que estiman aumentos de 0°C hasta casi 2°C al año 2050 (IPCC, 2013). En la Figura 2-5 se muestra el grafico de la modelación para los escenarios 2.6 y 8.5.

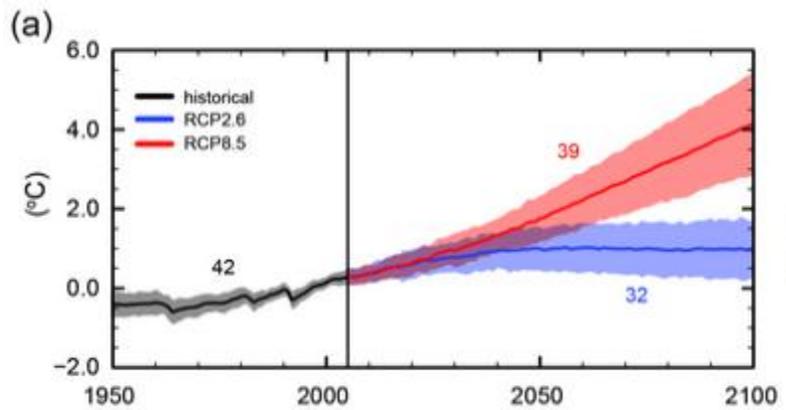


Figura 2-5: Cambio de temperatura global para distintos escenarios (IPCC, 2013).

Los antecedentes regionales, indican que en la zona central del país la temperatura aumentaría cerca de 1°C hasta el año 2050 (Rojas, 2012), mientras que la precipitación en la misma zona disminuirá cerca del 10% al año 2050 (CEPAL, 2012). En las Figura 2-6 y Figura 2-7 se pueden ver los cambios proyectados para esta zona.

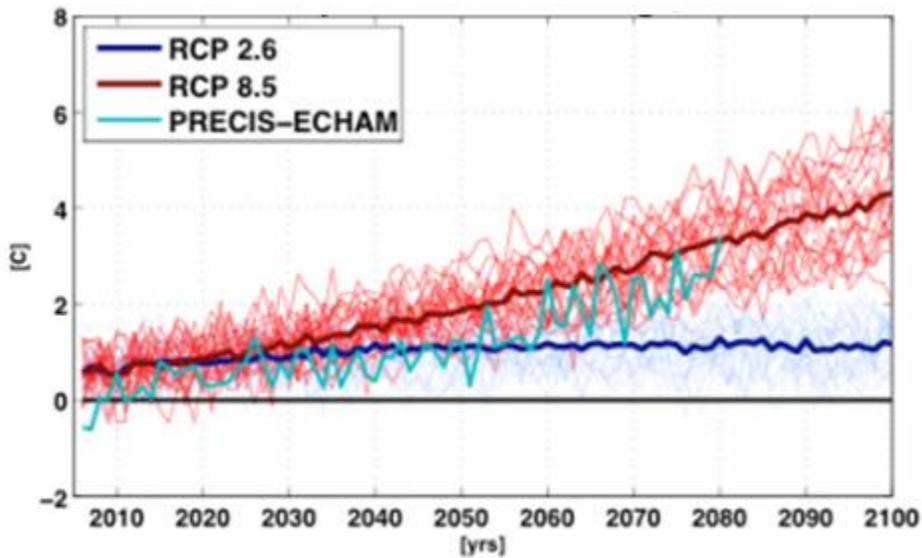


Figura 2-6: Cambios de temperatura para la zona central de Chile bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 (Rojas, 2012)

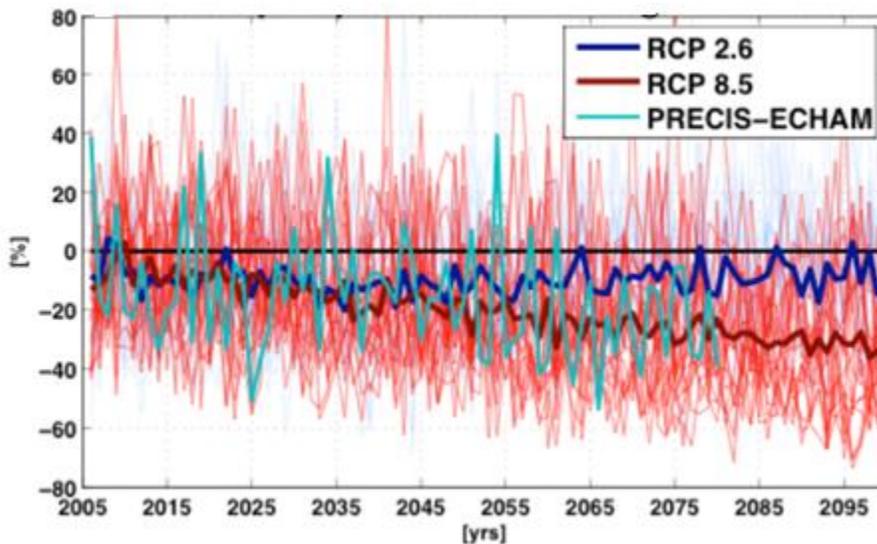


Figura 2-7: Cambios en la precipitación para la zona central de Chile bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 (Rojas, 2012).

## 2.4 Balance hidrológico glaciar

En lo que respecta al balance hidrológico de un glaciar, existen estudios de la influencia de estos en un determinado cauce, como por ejemplo (Baraer et al., 2012), sin embargo este corresponde a glaciares tropicales, los cuales tienen diferencias con los glaciares de la zona central de Chile en lo que respecta a los factores que interactúan con ellos, como los nombrados en el capítulo 1.1 Antecedentes.

Las ecuaciones son producto de un balance que incluye: efectos de sublimación, precipitaciones, área de la cuenca, relación de volumen y área glaciar, entre otros. Estos datos pueden estimarse o ser parte de alguna campaña de medición. Una ecuación preliminar de cómo obtener un balance hidrológico para la estación normal viene determinada por (Baraer et al., 2012):

$$Q_n = d_{melt} \left\{ \beta A_{glo}^2 \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \gamma_i)^2 [(1 - \gamma_n)^2 - 1] + pp_n A_{glo} \prod_{i=2}^n (1 - \gamma_i) \right\} \quad (2-1)$$

$$+ (pp_n - et_{ngl}) \left[ A_t - A_{glo} \prod_{i=2}^n (1 - \gamma_i) \right] - ET_{rl}$$

Donde los parámetros corresponden a:

$d_{melt}$  = Porción no sublimada de la ablación anual

$et_{ngl}$  = Evaporación en el área sin cobertura glaciar

$\beta$  = Relación entre el volumen glaciar dividido por el área glaciar

$A_{glo}$  = Área glaciar inicial

$\gamma$  = Cambio interanual de área glaciar, donde  $i$  representa el inicio de la tasa y  $n$  la tasa final

$A_t$  = Área total de la cuenca

$pp$  = Precipitación promedio recibida

$ET_{rl}$  = Evaporación desde ríos y lagos

Además se debe considerar si es que existe o no una componente proveniente de aguas subterráneas.

El mismo estudio estima que dentro de las etapas del retroceso glaciar se puede obtener una curva conceptual que muestra que a medida que el glaciar retrocede, se produce una mayor descarga hacia el río, sin embargo esto tiene un peak y después comienza la disminución del caudal hasta el punto crítico en que se produce la desaparición del glaciar o los glaciares, según sea la zona de estudio. En la imagen Figura 2-8 la línea negra gruesa y la línea azul gruesa representan el promedio anual y la descarga de la estación seca respectivamente. La línea punteada naranja corresponde al coeficiente de variación del caudal anual. Como las fases son conceptuales, los ejes se mantienen sin unidades. (Baraer et al., 2012).

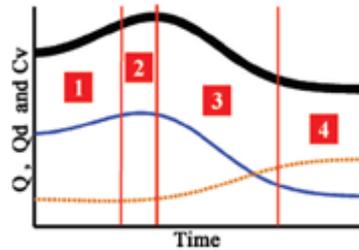


Figura 2-8: Fases "típicas" del impacto hidrológico del retroceso glaciar

## 2.5 Metodología

### 2.5.1 Análisis de la revisión bibliográfica

Una vez concluida la revisión bibliográfica los pasos a seguir tienen una orientación clara y apuntan principalmente a determinar los parámetros que son más representativos para la cuenca, para modelar la descarga de los glaciares. Se han realizado estudios en Chile relacionados con balance hidrológico de los glaciares, varios de estos han incluido diversos parámetros y se han realizado aforos en distintas épocas del año en lugares lo más cercano posible a la descarga de los glaciares. La proyección de esta descarga en función del cambio climático y las variables que se estiman que cambiarían en esta región, es un área de estudio reciente. Este trabajo pretende de una u otra forma establecer las primeras líneas respecto a cuales podrían ser las consecuencias en la descarga en el medio plazo en el área a estudiar.

### 2.5.2 Estudio de las variables que inciden en el retroceso glaciar

En la primera etapa del análisis se determinarán cuáles son las principales variables que influyen en el retroceso glaciar. La cobertura glaciar de una cuenca es un parámetro crítico en lo que respecta a la respuesta hidrológica (Baraer et al., 2012), por lo que es necesario generar un modelo hidrológico para predecir el impacto sobre la cuenca, expresado en el comportamiento del caudal futuro. La cobertura glaciar, debe ser analizada no solo como área, sino que también como volumen (espesor). Al día de hoy, existen diversas predicciones respecto al comportamiento meteorológico de los posibles escenarios futuros (Garreaud, 2011) (Rojas, 2012) y son estos los que se relacionarán bajo distintas perspectivas para estimar el retroceso glaciar que se podría dar más adelante.

### 2.5.3 Análisis según periodo de deshielo y periodo anual

Una vez determinados los factores que afectan al retroceso e identificada la lengua de retroceso, se debe generar una ecuación de balance hídrico que contenga los factores locales fundamentales. La precipitación pluvial es primordial en el sistema de glaciares tropicales de la cordillera blanca en Perú (Baraer et al., 2012). Sin embargo en Chile, dadas las condiciones geográficas, la precipitación pluvial no es un factor fundamental, siendo la nieve uno de los parámetros fundamentales para el

estudio. La ecuación de balance hídrico, debe contener una relación entre la nieve caída, la precipitación en la cuenca de estudio, el cambio volumétrico anual de un glaciar expresado en agua equivalente, sublimación desde la superficie de hielo y nieve, áreas cubiertas por glaciares, tasa anual de pérdida de hielo y la fracción anual de hielo perdido que no es resultado de sublimación. Esta ecuación tendrá diferencias entre el periodo de deshielo y el periodo anual, para los cuales se debe determinar valores representativos mediante métodos hidrológicos y/o probabilísticos de distribución y frecuencia según la cantidad de datos disponibles en zonas cercanas.

#### **2.5.4 Calibración del modelo**

Para calibrar el modelo, se debe obtener series de datos para las diferentes variables:

- Valores físicos (áreas, volumen) de glaciares de la zona. A lo menos 4 glaciares: Olivares Alfa, Olivares Beta, Juncal Sur y Olivares Gamma.
- Datos de caudal en diferentes cuencas con orígenes glaciares. Revisión de posibles estaciones de la DGA y CECS entre otras.
- Estaciones meteorológicas con medición de precipitación en zonas aledañas a los glaciares en estudio. Se analizará la posibilidad de obtener series de las estaciones: El Yeso, Yerba loca, Glaciar San Francisco, Valle Olivares y Codelco.

Una vez obtenidas las series de datos se procede a calibrar el modelo hasta lograr una validación de este con el fin de poder medir los impactos actuales y futuros del retroceso.

#### **2.5.5 Impacto hidrológico del retroceso glaciar**

Una vez validado el modelo, se realizan análisis de sensibilidad del modelo a los escenarios de retroceso glaciar para determinar cómo se comporta ante variaciones porcentuales de precipitación y cambios de temperatura que se esperan para la zona en el mediano plazo (2050). Con esto se puede cuantificar porcentualmente el impacto hidrológico en los caudales específicos, producto del retroceso glaciar. Se realizarán simulaciones ante posibles cambios en el área glaciar y el potencial de este escenario para influenciar los regímenes hidrológicos en el futuro.

### 3. Zona de estudio

La zona de estudio es la cuenca del Río Olivares, aguas arriba de la confluencia con el Río Colorado que corresponde a una sub cuenca de la cuenca del Maipo en donde se emplaza el Río Olivares, la que de ahora en adelante para simplificar se denota como “cuenca del Río Olivares”. En ella se encuentran los glaciares que se estudian en el trabajo.

Mediante el satélite Aster (Proyecto de la NASA y el gobierno de Japón) se obtuvo el modelo de elevación digital (DEM) que contiene la información espacial y altimétrica. El DEM utilizado corresponde a un cuadrante entre las latitudes 33°- 34° Sur y longitud 71°-70° Oeste. De aquí en adelante, se utilizan las coordenadas en WGS84 UTM para los efectos de cálculo y ubicación.

#### 3.1 Ubicación

La cuenca del río Olivares se encuentra ubicada en la Región Metropolitana en la Provincia Cordillera. Corresponde a una cuenca de régimen nivo-glacial y el principal río de la cuenca es el río Olivares. (Figura 3-1). Nace al Noreste de la Región Metropolitana junto al límite con Argentina y al sureste de las faenas mineras de Codelco Andina y Angloamerican. El río Olivares confluye con el río Colorado y pasa a llamarse río Colorado que finalmente se une con el Río Maipo en el sector del Alfalfal.

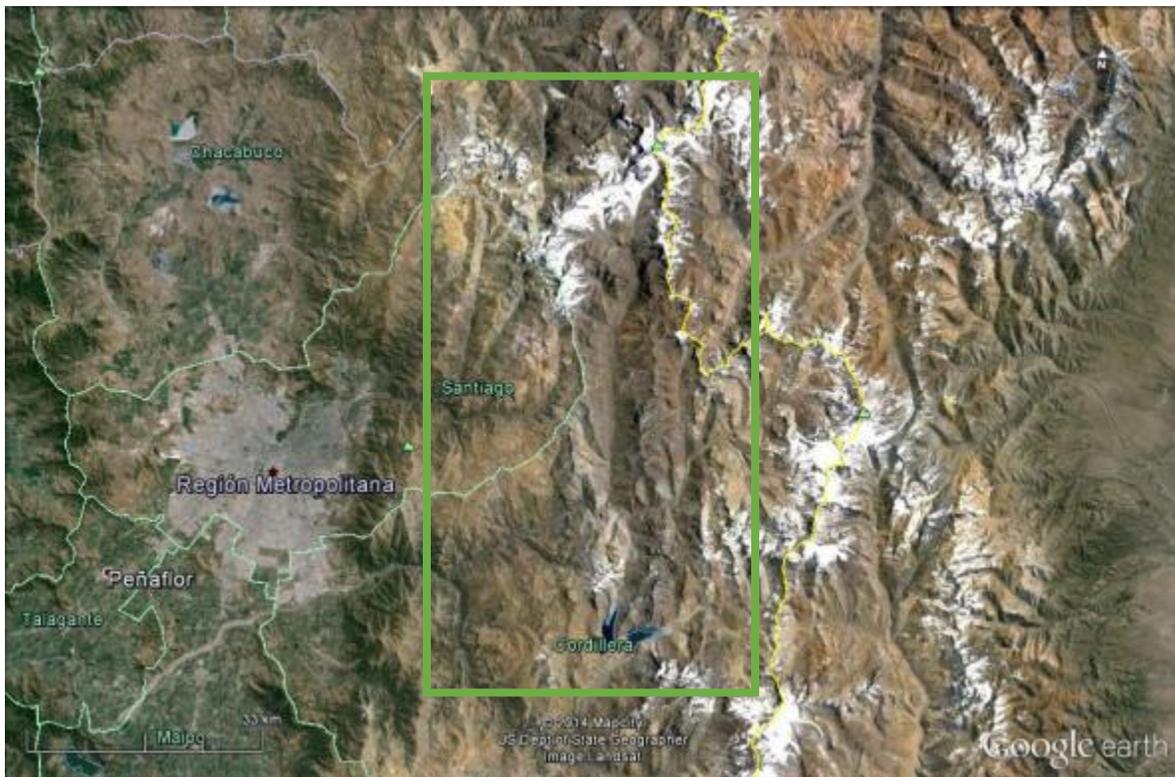


Figura 3-1 Vista general de la Región Metropolitana y la Cuenca Olivares.

Para el estudio de la cuenca se acotó el DEM a un cuadrante con las coordenadas 379366 Este – 402547 Este, 6343335 Norte – 6289982 Norte en el Huso 19. Para el procesamiento de este DEM se utilizaron los softwares Qgis versión 2.4 y Grass 6.4.4 con su herramienta r.watershed. Una vez procesada la imagen se obtuvo un punto de cierre de la cuenca correspondiente a las coordenadas 394323 Este y 6293368 Norte (Figura 3-2).



*Figura 3-2 Cuenca del Río Olivares aislada de la region*

Sobre la cuenca, en el lado norte se encuentran los glaciares que serán estudiados. De Oeste a Este están: Olivares Alfa, Olivares Beta, Olivares Gamma y Juncal sur (Figura 3-3 ). Existen otros glaciares que serán tomados en cuenta para el balance del río, pero que no se tienen muchos datos de ellos y otros que no tienen nombre, por lo que serán llamados solo por el código de la DGA.

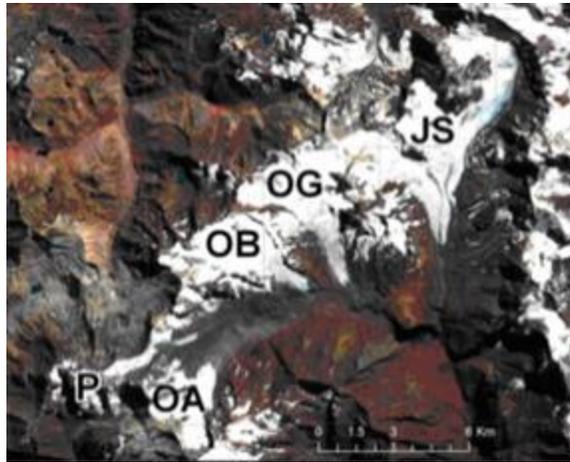


Figura 3-3 Glaciares en la Cuenca del Río Olivares (CECS, 2013)

### 3.2 Características morfológicas

La cuenca presenta diferencias de hasta 4 mil metros en lo referente a altitudes. Se caracteriza por tener altas cumbres, llegando a un máximo de 6024 metros sobre el nivel del mar al este cerca del Nevado El Plomo y un mínimo de 1528 metros sobre el nivel del mar al final del valle en la confluencia con el río Colorado (Figura 3-4 ).

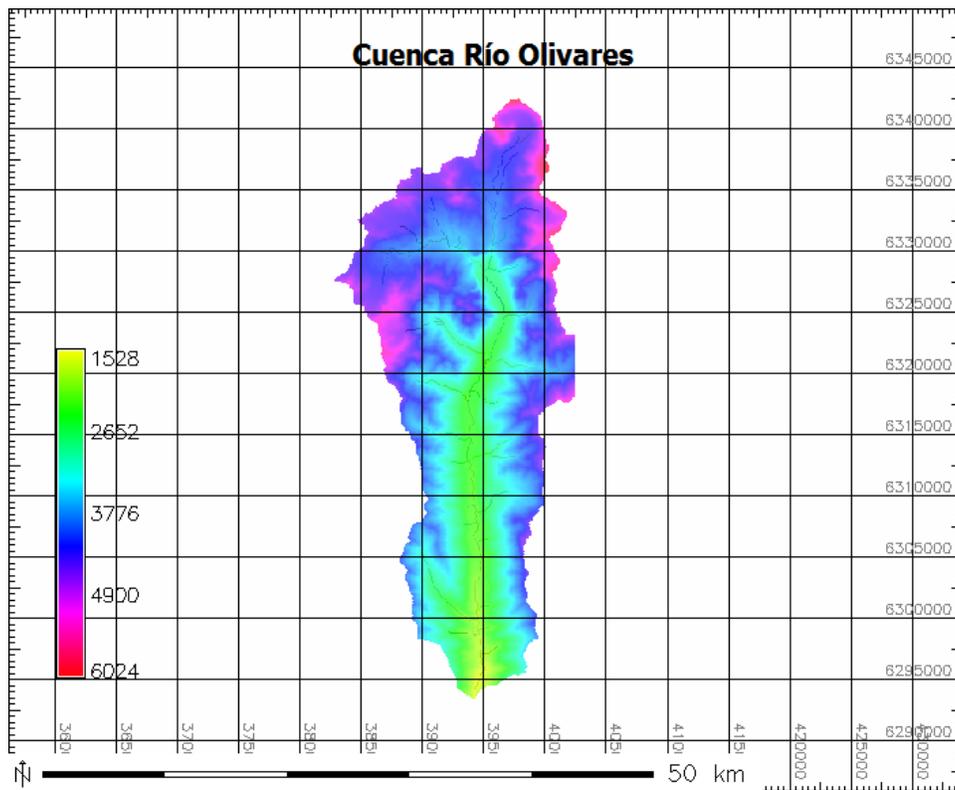
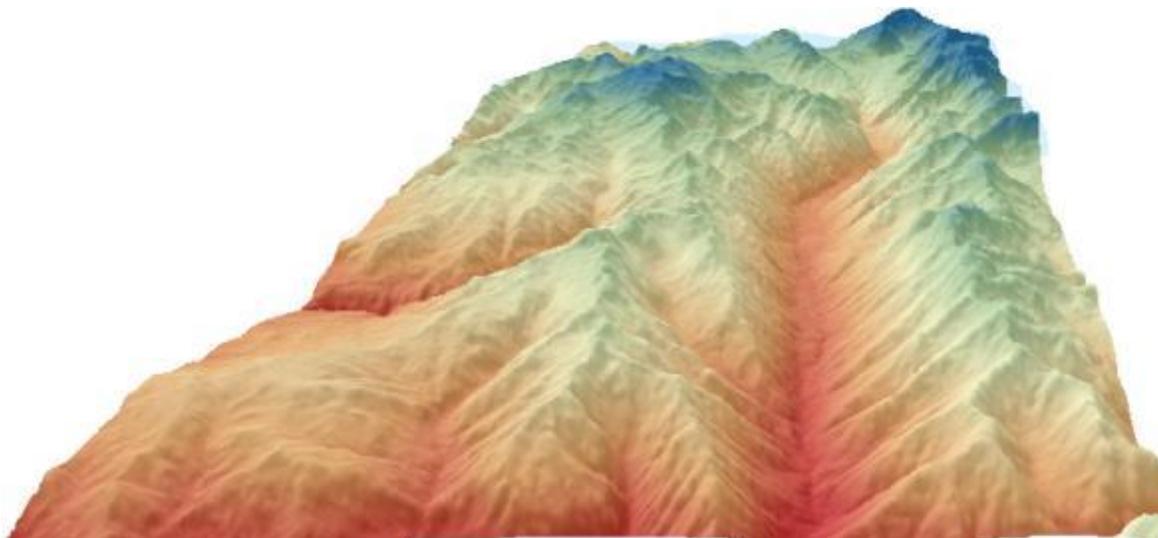


Figura 3-4 Mapa de alturas de la cuenca del Río Olivares en msnm.

La cuenca presenta una pendiente media de 22% y tiene una forma de U en su sección transversal, que es la típica para cuencas de formación glaciaria (Figura 3-5). La cuenca tiene un área total de 537 km<sup>2</sup>. El porcentaje que corresponde a la cuenca sin los glaciares se verá más adelante en el sub capítulo de hidrología.



*Figura 3-5 Mapa de altitudes en 3d de la cuenca del Río Olivares*

### 3.3 Características geológicas

Las características geológicas de la cuenca del río Olivares se obtienen del mapa geológico de Chile elaborado por el Sernageomin (SERNAGEOMIN, 2014). En la (Figura 3-6) se puede apreciar las diversas formaciones geológicas; estas se clasifican de la siguiente forma según la nomenclatura del mapa:

- **M3i:** Mioceno Inferior-Medio. Complejos volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas. En la Cordillera Principal, regiones I a VIII: complejos volcánicos Doña Inés y Ojos de Maricunga; formaciones Cerro Las Tórtolas y Farellones.
- **OM2c:** Oligoceno-Mioceno. Secuencias volcanosedimentarias: lavas basálticas a dacíticas, rocas epiclásticas y piroclásticas. En la Cordillera Principal, regiones I a IX: formaciones Lupica, Escabroso, Abanico, Coya-Machalí, Curamallin (inferior).
- **M3g:** Mioceno Superior (13-7 Ma). Granodioritas de hornblenda y biotita, en menor proporción monzogranitos, monzonitas cuaríferas y monzodioritas. En la Cordillera Principal, regiones Metropolitana y VI: plutones La Gloria y San Gabriel.
- **Kia3:** Cretácico Inferior alto. Secuencias y complejos volcánicos continentales: lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas andesíticas a riolíticas, escasas intercalaciones sedimentarias. En las regiones I y II: formaciones Suca, Punta Barranco y

Estratos de Quebrada San Cristóbal; en la Cordillera Patagónica, región XI: Grupo Divisadero.

- Secciones blancas: Corresponden a Glaciares, ventisqueros y hielo continental
- Línea negra: Corresponde a un contacto geológico. Vale decir, la separación entre dos estructuras geológicas observadas.
- Flechas en sentido contrario ( -><-): Corresponde a un plano axial sinclinal
- Línea con triángulos: Corresponde a una falla inversa.

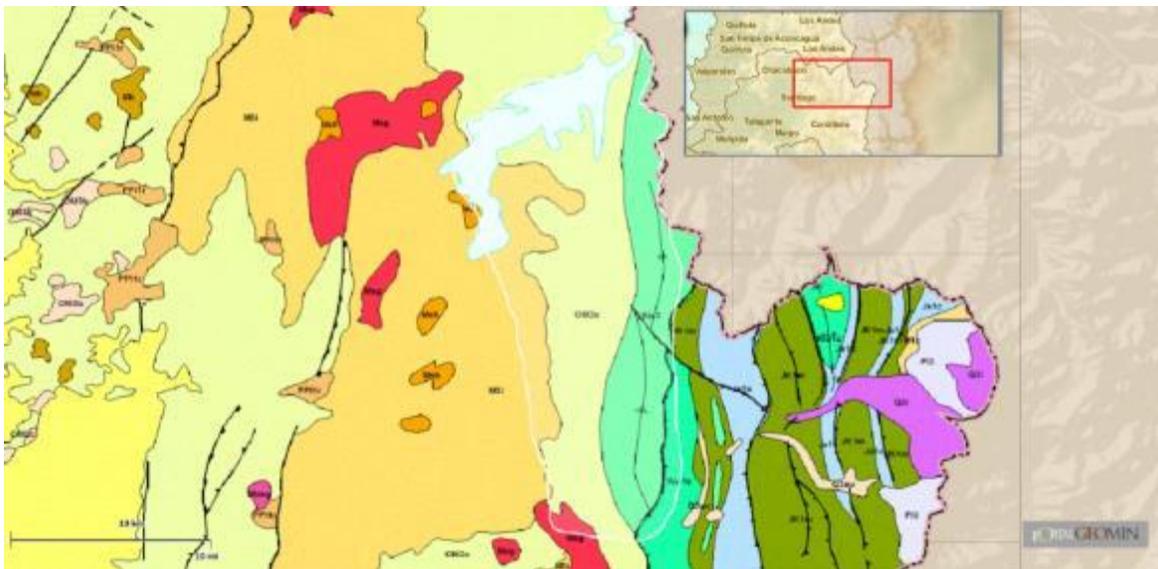


Figura 3-6 Mapa geológico de la cuenca del Río Olivares (SERNAGEOMIN, 2014).

### 3.4 Clima y meteorología

La zona presenta un clima templado cálido en el periodo de deshielo de duración de 4 a 5 meses. Este clima se encuentra en el sector andino de la Región, por sobre los 1.200 m de elevación, donde la inversión térmica le da el carácter de templado a pesar de la altura, contrarrestando su efecto. Las temperaturas en la noche descienden bastante, produciéndose frecuentes heladas. Con la altura las precipitaciones son mucho más abundantes, alcanzándose valores anuales superiores a 1.000 mm (Dirección Meteorológica de Chile, 2014).

### 3.5 Hidrología

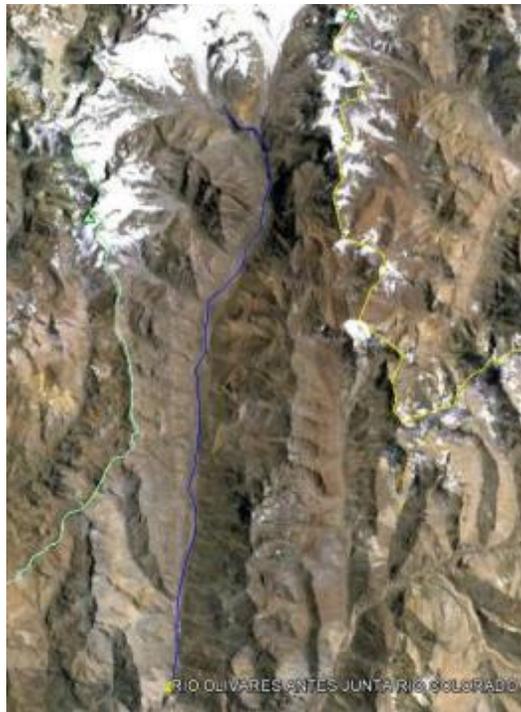
Tal como se revisó en el capítulo 2, la cuenca es de tipo nivo-glaciar, en donde, el derretimiento de la nieve causa el aumento de caudal del río, dando valores máximos en diciembre-enero. El periodo de deshielo se presenta desde octubre a marzo. El escurrimiento total debe considerar

como componentes la descarga producto del derretimiento de hielo, del derretimiento de nieve y la precipitación líquida.

Aguas abajo del Salto del Olivares en donde se juntan las aguas provenientes del Juncal Sur y los glaciares Olivares Alfa, Beta y Gamma hasta la salida de la cuenca, el Río Olivares tiene una longitud cercana a los 27km, con una pendiente media de 22%.

Respecto de las aguas subterráneas, según los visto en el capítulo 3.3 las rocas graníticas presentes conforman una barrera hidrogeológica que impide el paso de aguas subterráneas a la cuenca, la permeabilidad es prácticamente nula (CADE-IDEPE, 2004). Esta información permite descartar algunos factores en la ecuación de balance hídrico y será uno de los supuestos para obtener resultados.

El área de la cuenca calculada con Grass fue de 537 Km<sup>2</sup>, incluyendo una superficie de glaciares equivalente a 78.9 km<sup>2</sup> (GEOESTUDIOS-DGA, 2011) que corresponden a 14.7%. El detalle de cada glaciar y su superficie se verá más adelante. En la Figura 3-7 se puede ver el emplazamiento del río en la cuenca.



*Figura 3-7 Río Olivares en la Cuenca Olivares en coordenadas 394264 E, 6293308 S H19(salida).*

En la Figura 3-8 de izquierda a derecha, se puede apreciar el río en una vista 3D con diferencias de alturas, las líneas de escorrentías de la cuenca y las líneas de corriente en un DEM con una capa de Google Earth.

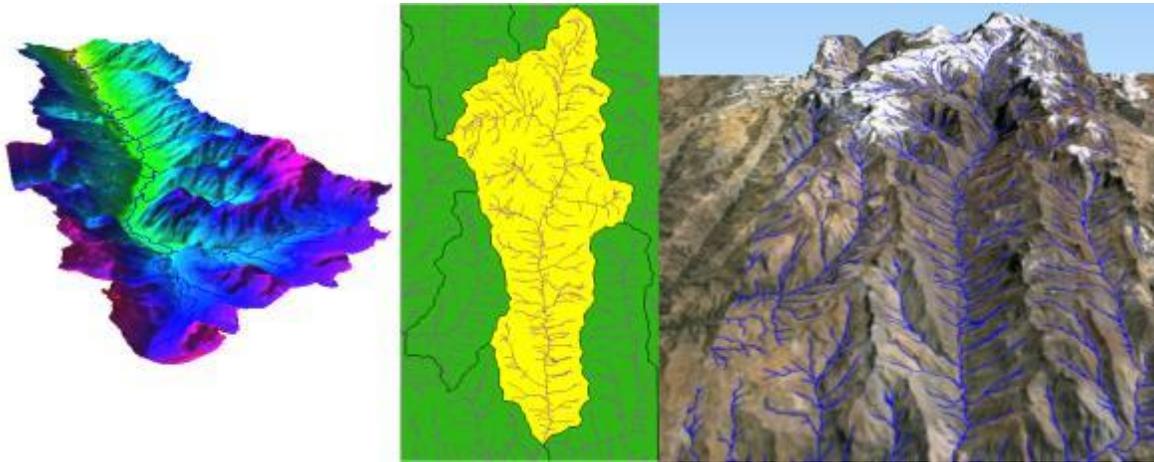


Figura 3-8 Líneas de escurrimiento del Río Olivares

### 3.6 Flora y Fauna

En lo que respecta a flora y fauna, la bibliografía (CADE-IDEPE, 2004) nos indica lo siguiente:

*“La cuenca presenta una clasificación vegetal llamada Estepa alto-andina de los Andes Mediterráneos y matorrales Andinos esclerófilos. Tiene gran importancia para la flora y fauna andina y alto grado de naturalidad. Destaca la variedad de elementos positivos para la vivencia del paisaje (esteros, cajones, serranías, glaciares).*

*Las estepas alto andinas de los Andes Mediterráneos se caracterizan como unidad natural por dos factores principales propios del ambiente físico. En primer lugar, desde el punto de vista climático corresponde a un territorio que tiene predominantemente precipitaciones de invierno, en un gradiente que aumenta de norte a sur. En segundo lugar, se caracteriza por un relieve abrupto y montañoso, con altas montañas de laderas escarpadas, en que son frecuentes los litosoles, concediendo un aspecto general de desierto de altitud.*

*La zonación altitudinal de las comunidades vegetales es marcada, siendo muy importante en el patrón de su distribución factores tales como el relieve y la altitud, fisonómicamente, la forma de vida dominante son las plantas bajas, herbáceas o arbustivas, de carácter pulvinado, aunque en muchos lugares predominan las gramíneas en mechón. En los pisos inferiores, penetran fuertemente los elementos esclerófilos en el norte y caducifolios en el sur”*

Dadas las características de la zona, se concluye que presenta un porcentaje bajo de cubierta vegetal que será calculado más adelante para determinar factor de evapotranspiración.

## **4. Información disponible y parámetros**

La información disponible para la cuenca se analizará en cada uno de los capítulos enumerados más abajo, los cuales se separan en precipitación, temperatura, caudal y variables meteorológicas. Esta información proviene de estaciones de mediciones públicas y privadas, las variables meteorológicas que se describirán provienen de lecturas complementarias y datos estadísticos, por lo que serán las variables que se ajustaran en el modelo.

### **4.1 Variables Hidrológicas**

Dentro de las variables meteorológicas del modelo existen algunas que participan de manera directa en las ecuaciones y otras que participan como variables para determinar parámetros. En principio se obtienen valores para cada una de estas variables para después ser corregidos de acuerdo a la calibración de los mismos.

#### **4.1.1 Sublimación**

La sublimación corresponde al paso de la materia desde sólido a gas. En el caso de los glaciares esto es muy común debido al cambio de temperatura que se produce una vez que llega el periodo de deshielo. Los primeros meses la sublimación tiende a ser mayor porque la temperatura no es suficientemente alta para comenzar el proceso de deshielo por completo (CECS, 2013). La pérdida de masa se llama ablación, que corresponde a lo perdido por efectos de derretimiento y sublimación.

La ablación no es un valor único, incluso en un mismo glaciar, así mismo el porcentaje correspondiente a cada componente puede variar, por ejemplo, las superficies rugosas incrementan el flujo turbulento sobre la superficie, y por lo tanto la sublimación, dejando menor energía disponible para derretimiento, por lo tanto la resultante correspondiente a sublimación es mayor en la parte baja de un glaciar que en la parte alta (Winkler et al., 2009).

En estudios anteriores se han determinado diversos rangos de sublimación. Por ejemplo en Sierra Nevada, California, la sublimación puede llegar a tener valores de hasta el 30% de la ablación total (Leydecker & Melack, 2000). En Chile para la Cuenca Alta del Río Aconcagua, que queda relativamente cerca de la cuenca de estudio, se estimaron valores máximos de sublimación cercanos al 32% de la ablación total sobre nieve (Martínez, 2010).

En el sector de los glaciares alfa y beta se han realizado balances de energía con datos tomados en mediciones experimentales durante los meses de noviembre a abril de las temporadas 2012 y 2013, obteniendo valores de sublimación promedio para varios meses del año en términos porcentuales de la ablación total (CECS, 2013). En base a esos resultados se confeccionó la Tabla 4-1 como representativa de la sublimación de los glaciares de la cuenca del Río Olivares. En base a los criterios de temperaturas y de superficies de los glaciares, fueron rellenados los meses que no fueron medidos experimentalmente comparándolos con los que si fueron medidos.

Mes	Sublimación [mm/día]	Porción de derretimiento correspondiente a Sublimación [%]	Condición del dato
Diciembre	1,3	9,5	Medido
Enero	0,65	2,75	Medido
Febrero	0,5	3,25	Medido
Marzo	1,3	10,25	Medido
Abril	0,95	11,25	Medido
Mayo	0,6	8	Dato Rellenado
Junio	0	0	Dato Rellenado
Julio	0	0	Dato Rellenado
Agosto	0	0	Dato Rellenado
Septiembre	0,3	3	Dato Rellenado
Octubre	0,4	6	Dato Rellenado
Noviembre	0,9	8	Medido

Tabla 4-1 Porcentajes de sublimación para los Glaciares de la Cuenca del Río Olivares

De esa forma se obtienen los parámetros que en principio se utilizan para el modelo; estos se dividen en el promedio anual de sublimación y el promedio del periodo de deshielo y se muestran en la Tabla 4-2, tanto en mm/día como en porcentaje del derretimiento total.

Promedio Anual [mm/día]	Promedio Anual [%]	Promedio Deshielo [mm/día]	Promedio en periodo de Deshielo
0,58	5,17 %	0,84	6,63 %

Tabla 4-2 Promedio anual y del periodo de deshielo de la sublimación

#### 4.1.2 Evaporación

La evaporación corresponde al paso de la masa desde líquido a gas; en este trabajo se decidió separar los conceptos de sublimación y evaporación no solo porque en términos másicos corresponden a conceptos diferentes, sino que también para separar el balance hidrológico en términos de lo que corresponde a la cobertura de los glaciares y al área no cubierta por glaciares dentro de la cuenca.

En lo que respecta a la evaporación en el área no cubierta por glaciares, se debe separar en dos variables, una de ellas es la evaporación correspondiente al área de la cuenca y otra corresponde a la evaporación desde los cuerpos de agua existentes en la cuenca, que en este caso sería la evaporación desde el río Olivares.

La evaporación se tomará como promedio anual en base a los promedios mensuales y como promedio del periodo de deshielo en base a los promedios mensuales de los meses correspondientes. Para el cálculo de la evaporación se pueden utilizar varias fórmulas (Vargas, 2012) que necesitan de distintos parámetros para su determinación (ver Anexos)

Se tomaron datos de evaporación de una estación existente (Estación Yerba Loca) y se configuró una serie con valores de evaporación para la cuenca Olivares que se resumen en la Tabla 4-3

Parámetros	Anual	Periodo de deshielo (Oct -Mar)
Evaporación promedio [mm/día]	2.29	3.99
Evaporación Real [mm/año]	668	582
Largo Río[m]	50000	50000
Ancho del Río [m]	10	15
Evaporación del Río [m <sup>3</sup> /día]	1143	2991

Tabla 4-3 Evaporación Anual y diaria para la cuenca del Río Olivares

## 4.2 Caudales

Los caudales en la salida de la cuenca del río Olivares, corresponden al escurrimiento de la cuenca de 537 km<sup>2</sup>. En el punto aguas abajo de la cuenca, se encuentra la estación fluviométrica de la DGA “Río Olivares antes junta Río Colorado”, que de acá en adelante llamaremos “estación Olivares”. Los datos principales de la estación Olivares se encuentran en la Tabla 4-4:

Estación Olivares	
Coordenada UTM E	394398
Coordenada UTM N	6294001
Altura [m] (aprox)	1500
Inicio de datos	Marzo - 1991

Tabla 4-4 Estación fluviométrica Río Olivares antes de la Junta con el Río Colorado

Para el periodo de estudio se separó la estadística de caudales entre el promedio anual y el periodo de deshielo, dado que la influencia de los glaciares y el derretimiento de nieve se da principalmente en los meses de octubre a marzo. Sin embargo la información disponible no se encuentra en régimen natural, por lo que fue necesario realizar algunas modificaciones (ver Anexos).

En la Tabla 4-5 se presentan estos datos de caudal en régimen natural para la cuenca desde el periodo hidrológico 1991-1992 hasta el periodo 2013-2014:

Año	Promedio periodo de deshielo [m <sup>3</sup> /s]	Promedio Anual [m <sup>3</sup> /s]
1991-1992	28.74	16.48
1992-1993	13.51	9.24
1993-1994	15.67	10.79
1994-1995	12.30	8.20
1995-1996	10.88	7.41
1996-1997	8.18	5.61
1997-1998	17.04	10.36
1998-1999	10.67	7.37
1999-2000	9.60	6.18
2000-2001	18.40	10.88
2001-2002	14.10	9.10
2002-2003	18.17	11.31
2003-2004	12.79	8.25
2004-2005	10.77	7.24
2005-2006	20.68	12.58
2006-2007	12.91	9.12
2007-2008	11.10	7.63
2008-2009	13.90	9.08
2009-2010	11.18	7.74
2010-2011	7.73	6.08
2011-2012	9.94	6.51
2012-2013	9.33	6.39
2013-2014	8.95	6.64

*Tabla 4-5 Promedio periodo de deshielo y Promedio Anual de caudales de la estación Río Olivares en m<sup>3</sup>/s*

Aunque no es un valor que se ocupe más adelante, el promedio de los caudales medios anuales es 8.7 m<sup>3</sup>/s mientras que el mismo valor para la serie de 1962 a 1983 es 8.65 m<sup>3</sup>/s (ver Anexos).

Al analizar gráficamente los datos se puede ver la consistencia entre el periodo de deshielo y el promedio anual, siendo el primero más alto que el segundo. La tendencia lineal para ambos en la Figura 4-1 se puede ver más acentuada a la baja el periodo de deshielo que el promedio anual. Es posible que los valores del año 1992 puedan estar acentuando aún más esta tendencia lineal a la baja; Es por eso que en la Figura 4-2 se simula un comienzo de la serie desde octubre del año 1992 en adelante, en donde se puede apreciar la misma tendencia (el periodo de deshielo tiene una pendiente más pronunciada que el promedio anual). Para el primer caso se proyecta que las líneas de tendencia del periodo de deshielo con el promedio anual se junten en 20 periodos más,

equivalentes a 1 año cada periodo, mientras que para el segundo caso faltan 50 periodos. Esto no significa que en la realidad en 20 o en 50 años más los caudales de ambos ciclos (deshielo y anual) sean iguales, ya que el proceso de nieve y derretimiento seguirá su curso, pero si puede dar una señal respecto al derretimiento de las masas de hielo o cambios en el clima. Ahora bien, si realizamos un análisis estadístico para obtener el intervalo de confianza de estas rectas, con la distribución t-Student con 22 grados de libertad y  $\alpha= 0.5$ , se obtiene que la hipótesis incluye al cero (valores entre -1.6 y 1.3), vale decir, que la línea de tendencia lineal es un mal predictor de los caudales.

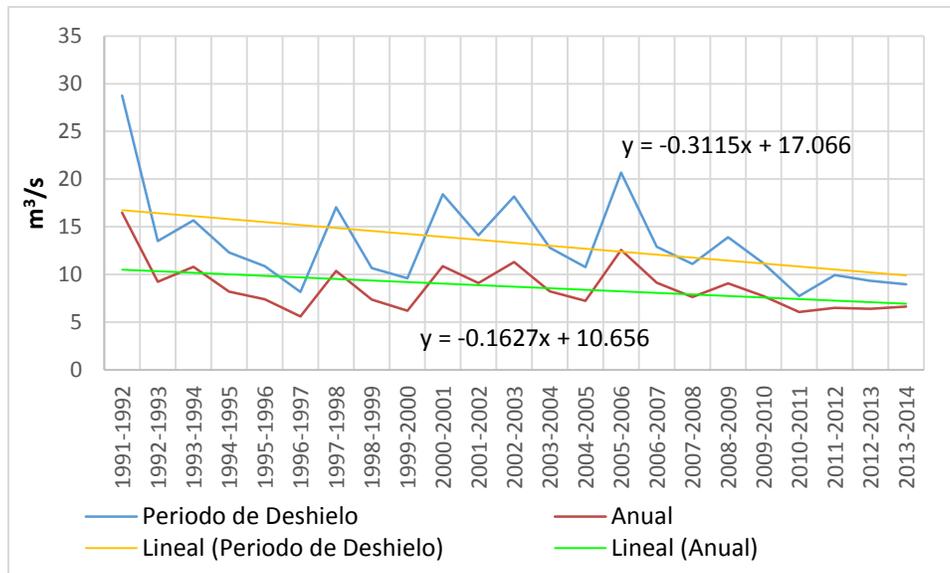


Figura 4-1 Tendencia de caudales en periodo de deshielo y promedio Anual

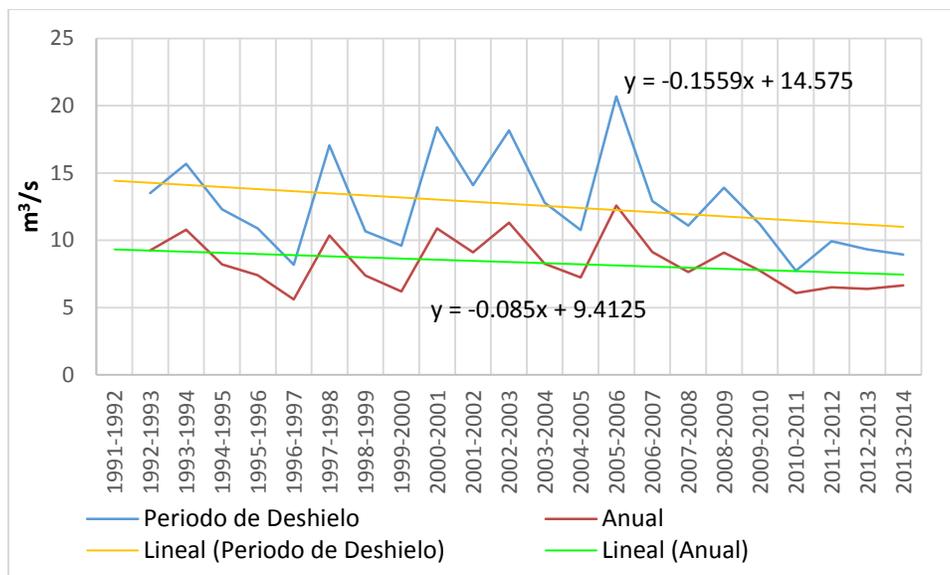


Figura 4-2 Tendencia de caudales en periodo de deshielo y promedio Anual con corrección de escurrimiento inusual

### 4.3 Información glaciar

La información glaciar de la cuenca data desde 1955 con fotografías aéreas que hicieron posible calcular el área de los glaciares de la cuenca en esa fecha (DGA, 2011b). Varios estudios posteriores ocupando la tecnología satelital en conjunto con campañas en terreno han podido determinar el área de los glaciares en la zona a través de los años.

Existen dos parámetros a determinar para este estudio, el primero tiene que ver con el área glaciar de toda la cuenca y el otro con el área glaciar perteneciente a los glaciares de interés y que generan más aporte en la cuenca. En la Tabla 4-6 se muestra los valores de áreas en km<sup>2</sup> (CECS, 2013) de los glaciares de interés y en base a ellos se conforma la Tabla 4-7 con los valores de los glaciares que existen en la cuenca, pero que están fuera del área de interés. Para esta última determinación se descartaron las masas de hielo que se identifican como glaciares de roca pues la discusión en torno a su equilibrio hídrico es un tema abierto hasta el día de hoy en el mundo académico y en los estudios de la región (GEOESTUDIOS, 2012-2013)

Glaciares							
Años	Olivares Alfa [km2]	Olivares Alfa' [km2]	Olivares Beta[km2]	Olivares Gamma [km2]	Juncal Sur [km2]	Total [km2]	% cuenca
1955		16.6	12	14.1	25.8	68.5	12.76
1967	6.8	9	11.2	13	25.1	65.1	12.12
1986	6	7	10.3	12.7	23.8	59.8	11.14
1991	5	5.8	9.7	12.2	22.7	55.4	10.32
2002	4.7	4.2	9.5	11.99	22.1	52.49	9.77
2004	4.6	4.1	9.4	11.9	21.9	51.9	9.66
2011	4.2	2.6	9.1	11.7	20.9	48.5	9.03
2013	3.9	2.5	8.8	11.5	20.8	47.5	8.85

Tabla 4-6 Áreas de los glaciares de la zona de interés en Km2 entre los años 1955 y 2013

Años	Área [Km2]
1955	34.67
2013	22.25

Tabla 4-7 Área glaciar en la Cuenca del río Olivares no perteneciente a la zona Olivares y Juncal

La reducción del área glaciar a través de los años es evidente, lo que hace confirmar la tendencia mundial respecto a la reducción progresiva de los glaciares en todo el mundo (WGMS, 2012). En la Tabla 4-6 la diferencia entre Olivares Alfa' y Olivares Alfa es porque el Glaciar Olivares Alfa' comprendía al otro y era una sola masa glaciar que comenzó a desfragmentarse hasta quedar la masa mayor de hielo con el nombre del glaciar y el resto como los fragmentos del glaciar. En la Figura 4-3 (CECS, 2013) se puede ver la reducción de área de los glaciares de la zona de interés.

La importancia de determinar el área, es que este parámetro permite determinar dos parámetros más: El volumen glaciar y la tasa anual de pérdida glaciar. Ambos parámetros se analizan a continuación

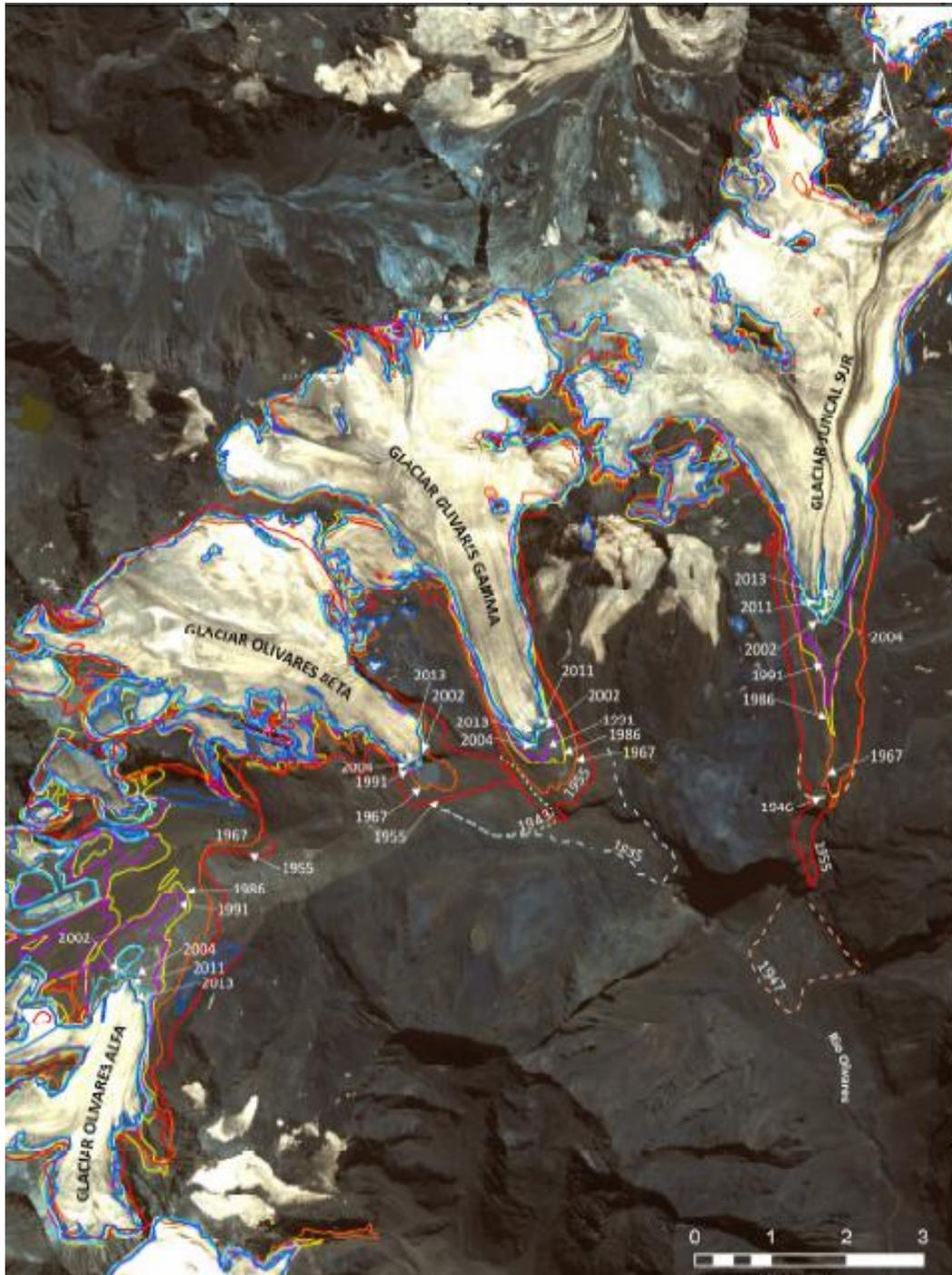


Figura 4-3 Reducción del área Glaciar en la Cuenca del río Olivares entre los años 1955 y 2013

### 4.3.1 Tasa Anual de Pérdida de área glaciar Y

Este parámetro corresponde a la tasa de pérdida de área de un conjunto de glaciares o de un glaciar en particular, se define como la diferencia interanual de áreas dividida por el área del año anterior. Las unidades de Y están expresadas en [%/año], en donde si  $Y = 0.1$  corresponde a una tasa de disminución de 10% al año. Este parámetro tiene especial importancia y su sensibilidad es

determinante en cuanto a la reducción en el tiempo de los glaciares y cual panorama puede reflejar (en mayor o menor medida) los efectos de cambio climático en la zona.

A la que de acá en adelante llamaremos TAPAG (tasa anual de pérdida de área glaciario) puede ser calculada con diversos métodos y en distintos escenarios. En este trabajo los escenarios son 2, el primer escenario es suponer que toda la masa de hielo en la zona principal de estudio, vale decir donde se encuentran los glaciares Olivares y Juncal Sur, interactúan en un solo conjunto y no de manera independiente, de tal forma que la TAPAG es para el sector completo. La ventaja de esto es que recrea la forma de eventuales micro climas producto de las masas de hielo. La desventaja es que no asimila la pérdida de probabilidad de formación de estos micro climas una vez que las masas de hielo desaparecen en determinados sectores. El segundo escenario es suponer que cada glaciar tiene una TAPAG. Esta última situación es mucho más cercana a la realidad, pero resta interacción con los otros glaciares. Los escenarios en conjunto, con los métodos de cálculo de la TAPAG dan valores que según la interpretación pueden ser sobrestimaciones o subestimaciones.

Para calcular la TAPAG se omitieron los años 1986 y 2011 por ser mediciones realizadas durante invierno. Si bien es cierto, los métodos de estimación de áreas glaciares se han tecnificado con el tiempo gracias a la resolución satelital y trabajo por bandas satelitales, una pequeña variación en las áreas puede crear una distorsión en la serie, por lo que es mejor tener las áreas en el mismo periodo, que en este caso corresponde al periodo seco. Los métodos de cálculo de la TAPAG se separaron para los dos escenarios, aunque en la práctica son los mismos métodos, pero representan valores distintos para cada escenario. Dada la cantidad de datos que existen, se hace el supuesto que entre los años medidos hay un cambio lineal de las áreas, lo que implica una TAPAG en sí misma, esto quiere decir que si hay 10 años de diferencia entre dos mediciones y 10 km<sup>2</sup> de diferencia entre las áreas, entonces el supuesto nos dice que cada año se perdió 1 km<sup>2</sup>. Las formas en cómo se calculó la TAPAG tienen nombres arbitrarios que fueron desarrollados durante el trabajo y no representan un método científico específico de algún autor, estos métodos para cada escenario son las siguientes:

#### 4.3.1.1 Escenario 1

- Promedio lineal: Una vez obtenida la serie de áreas de manera lineal entre cada estadio de medición, se procede a obtener una TAPAG entre cada uno de los años, con el promedio de todas las TAPAG se obtiene una TAPAG de 0.00629. Este valor se descuenta desde la primera medición (1955) y después desde la anterior generada por el método.
- Proyección logarítmica: Al igual que en el método anterior se realiza el mismo mecanismo, pero una vez que se tienen todas las TAPAG, se procede a graficar estas secuencias lineales para encontrar una tendencia (Figura 4-4). Una vez encontrada la ecuación, esta se aplica de la misma forma que el método anterior, pero considerando la variable "x" como los años. La ecuación (4-1) corresponde a la ecuación del método de Proyección logarítmica que tiene un R=0.4165.

$$\gamma = 0.1387 \ln(x) - 1.04685 \quad (4-1)$$

Dado que es un método en donde se utiliza una línea de tendencia de regresión logarítmica, existe una tendencia mucho más acelerada que en el método anterior cuando se proyecta hacia el futuro, lo que puede interpretarse como un método más representativo de condiciones climáticas adversas hacia el futuro y como aumentara la TAPAG.

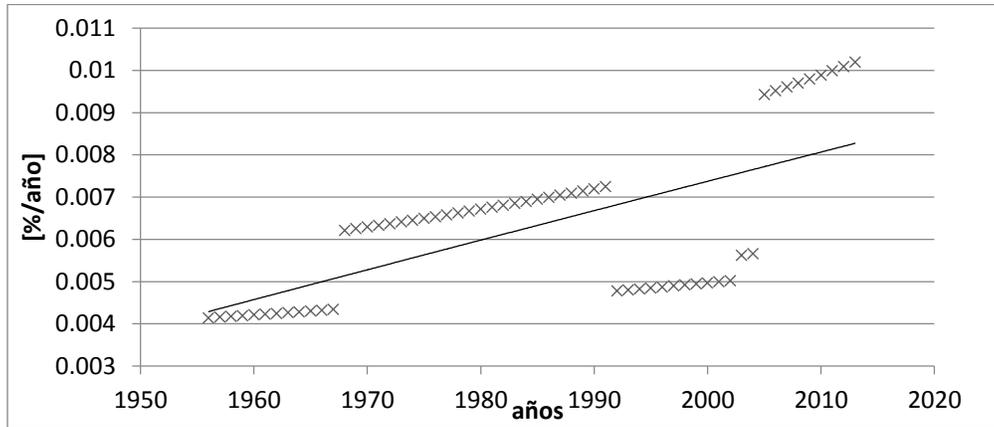


Figura 4-4 Tendencia logarítmica de la TAPAG para el conjunto de glaciares entre los años 1955 y 2013

- Proyección exponencial 1: Se toman los periodos medidos y entre ellos se calcula una TAPAG de manera tradicional, tomando el área inicial y final y el resultado dividiéndolo en la cantidad de años del periodo. Con este método se consiguieron 5 puntos que se ajustaron mejor a una línea de tendencia exponencial (Figura 4-5) con un  $R= 0.5385$  según la ecuación (4-2). El procedimiento posterior es similar a los otros métodos, en que se calcula un área en función del área anterior con la TAPAG dada por la ecuación que tiene como entrada el año a calcular.

$$\gamma = 3 * 10^{-14} * e^{0.01299x} \quad (4-2)$$

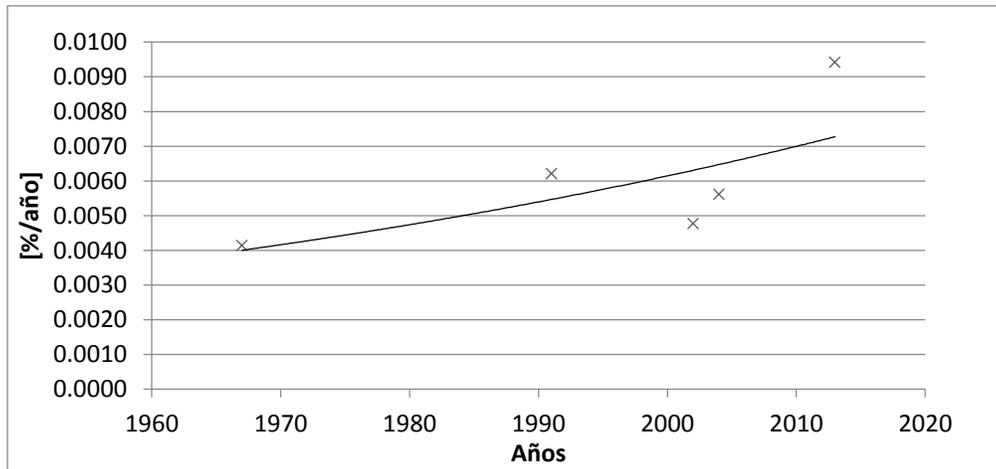


Figura 4-5 Tendencia exponencial de la TAPAG para el conjunto de glaciares entre los años 1966 y 2013

En este método también se presenta una aceleración en la tasa de disminución a medida que pasa el tiempo lo que se analiza más adelante.

- Proyección exponencial 2: La diferencia de este método con el anterior es que cada punto del gráfico (Figura 4-6) está compuesto por el promedio de las TAPAG's que se formaron por la interpolación lineal entre los datos de medición. Los 5 puntos se ajustaron a una tendencia exponencial de  $R= 0.4949$  según la ecuación (4-3). La aplicación de la TAPAG es igual que en los métodos anteriores.

$$\gamma = 4 * 10^{-14} * e^{0.01287x} \quad (4-3)$$

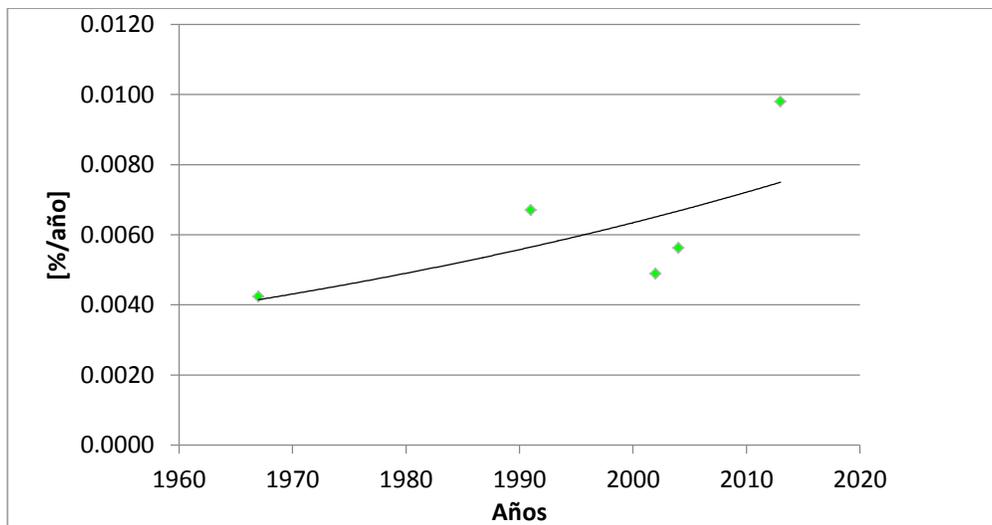


Figura 4-6 Tendencia exponencial2 de la TAPAG para el conjunto de glaciares entre los años 1966 y 2013

- Tasa anual general: Corresponde a la TAPAG calculada de manera simple entre el área del año 1955 y el área del 2013 dividido por la cantidad de años. Se obtiene una constante de 0.0052856 que se resta cada año al igual que el primer método.
- Tasa Anual años 90: Es idéntico al método de proyección logarítmica, pero en este caso se toma la serie de TAPAG desde el año 1991 en adelante (Figura 4-7) y se construye una tendencia lineal con un R= 0.805 representando por la ecuación (4-4). En este caso, se hace el supuesto que las condiciones meteorológicas anteriores a los últimos 20 años no se condicen con la nueva tendencia que podría estar afectada por cambios en el clima y otros factores externos y que estos cambios seguirán acrecentándose en el tiempo.

$$\gamma = 0.000335 - 0.663873 * x \quad (4-4)$$

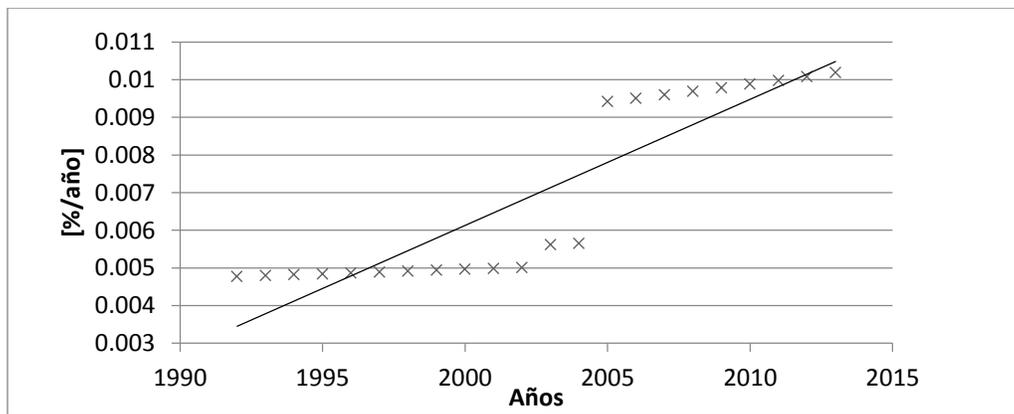


Figura 4-7 Tendencia lineal de la TAPAG para el conjunto de glaciares entre los años 1991 y 2013

Para este escenario los métodos comparados con la medición del 2013 en general se acercan bastante bien a la realidad, sin embargo la proyección hacia el futuro tiene variaciones importantes, la Tabla 4-8 muestra los principales valores entre el año 2013 y el año 2170.

Años	Valor medido	Área según promedio lineal [km <sup>2</sup> ]	Área según proyección logarítmica [km <sup>2</sup> ]	Área según proyección exponencial 1 [km <sup>2</sup> ]	Área según proyección exponencial 2 [km <sup>2</sup> ]	Área según tasa anual general [km <sup>2</sup> ]	Área Según tasa anual años 90 [km <sup>2</sup> ]
2013	47.50	47.505	47.446	51.763	50.119	50.373	47.354
2050	-	37.587	33.210	37.314	34.841	41.403	25.248
2100	-	27.416	17.678	16.981	14.576	31.765	5.114
2150	-	19.998	7.959	3.719	2.731	24.371	0.433
2170	-	17.626	5.523	1.437	0.959	21.920	0.126

Tabla 4-8 Proyección de área glaciar (km<sup>2</sup>) según distintos métodos entre el 2013 y el 2170 Escenario 1

Los índices NSE varían entre 0.8 y 0.95 para cada método tomando en consideración los valores lineales de las áreas entre cada valor real medido. El dato más relevante para este estudio es la proyección de área hacia el año 2050, dado que más allá pueden ser muchos factores los que

alteren los resultados. En lo que respecta al año 2050 existen diferencias importantes entre la tasa anual de los años 90 y los demás métodos, por lo que es necesario complementar esta información con lo que pueda proyectar el escenario 2. Tampoco se puede dejar de comentar el escenario total glaciar y las proyecciones para el siglo siguiente en que parece evidente una desaparición total de esta zona glaciar. Algunos de los errores que tienen todas estas proyecciones es que como son tasas de disminución porcentual, nunca llegaran a cero y tampoco incorporan variantes una vez que se pasa cierto umbral, como por ejemplo un área menor a  $1 \text{ km}^2$ . El comportamiento de esta gran masa de hielo una vez que se acerca a solo  $1 \text{ km}^2$  es una incógnita difícil de resolver, puesto que en algunos casos los glaciares no terminan por derretirse por completo si no que pasan a una transición entre un glaciar blanco, glaciar cubierto y glaciar de rocas (GEOESTUDIOS, 2012-2013), por lo que considerar que las masas de hielo ya se encuentran en estado de desaparición una vez que se acercan o pasan del umbral del  $\text{km}^2$  según las proyecciones, no es algo tan lejano a la realidad. Los resultados se pueden ver en la Figura 4-8.

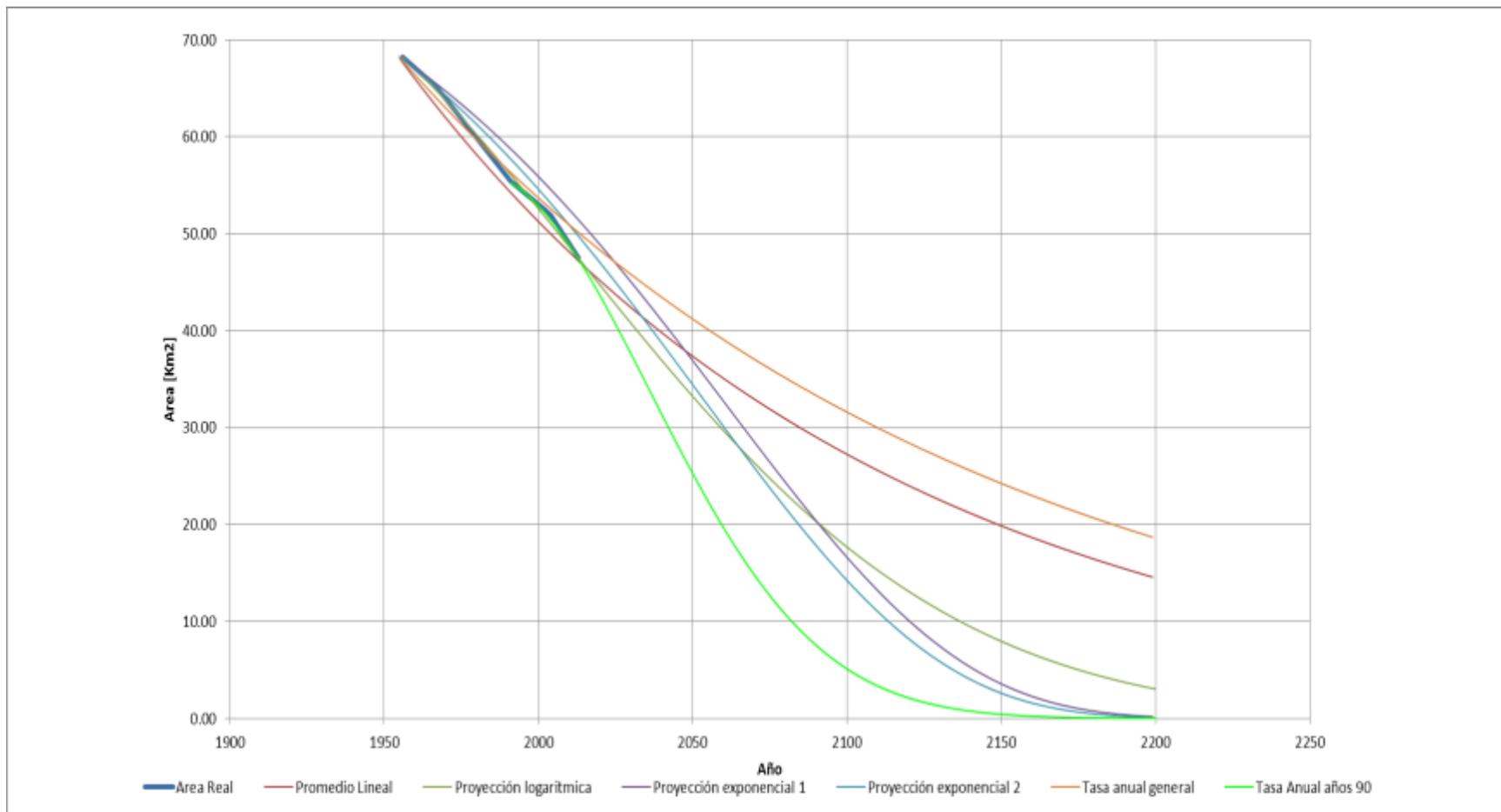


Figura 4-8 Proyección de derretimiento del Área glaciar bajo distintos métodos hasta el año 2200

### 4.3.1.2 Escenario 2

Para este escenario se realizaron las proyecciones para cada glaciar de la Tabla 4-6 entre los años en que se midieron. Para algunos glaciares existió una correlación de los datos que permitió obtener ecuaciones y para otros la correlación fue muy baja, por lo que se omitieron algunos métodos para ciertos glaciares.

Los métodos de promedio lineal y tasa anual general, fueron aplicados desde el año de inicio de la medición, mientras que los demás métodos fueron aplicados solo desde el año 1991 en adelante dado que la relación de los datos desde el año 1955 hasta el 2013 tenía una correlación muy baja. Por esto último, la proyección logarítmica no se ocupó ya que en todos los glaciares no existía o era bajo 0.1 la correlación como se aprecia en la Figura 4-9.

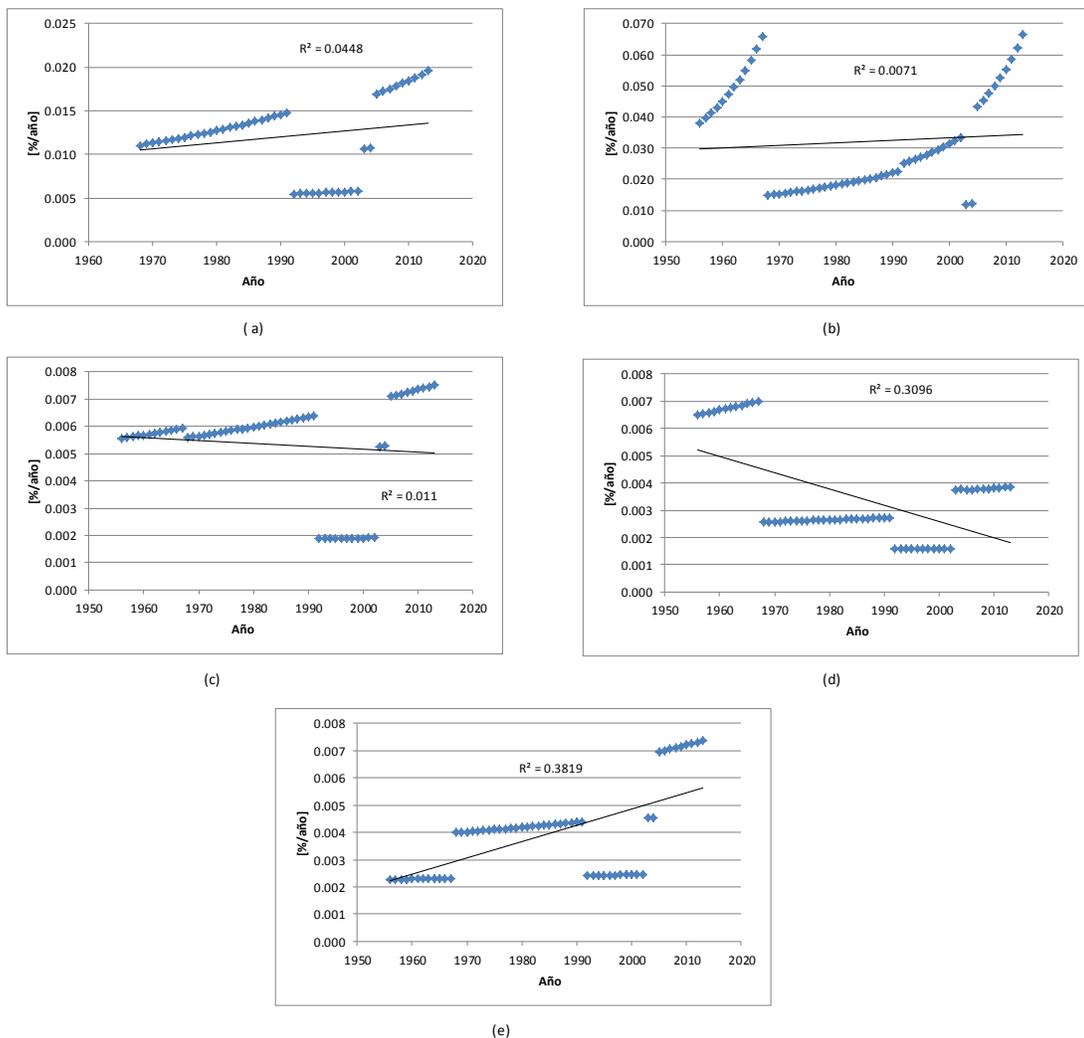


Figura 4-9 TAPAG entre los años 1955 y 2013 para los glaciares de la cuenca Olivares.

(a) Glaciar Olivares Alfa, (b) Restos del glaciar Olivares Alfa, (c) Glaciar Olivares Beta, (d) Glaciar Olivares Gamma y (e) Glaciar Juncal sur.

En términos prácticos para las proyecciones exponencial 1 y exponencial 2 las tendencias en este caso fueron lineales, por lo que el nombre no correspondería mucho con el método, sin embargo no se cambiaran los nombres para entender la naturaleza del procedimiento más allá de que el nombre nace de resultado que ahora fue distinto, pero que contienen una génesis idéntica. Con respecto al método de tasa anual años 90 se obtuvieron correlaciones mayores al 0.7 en todos los casos (Figura 4-10).

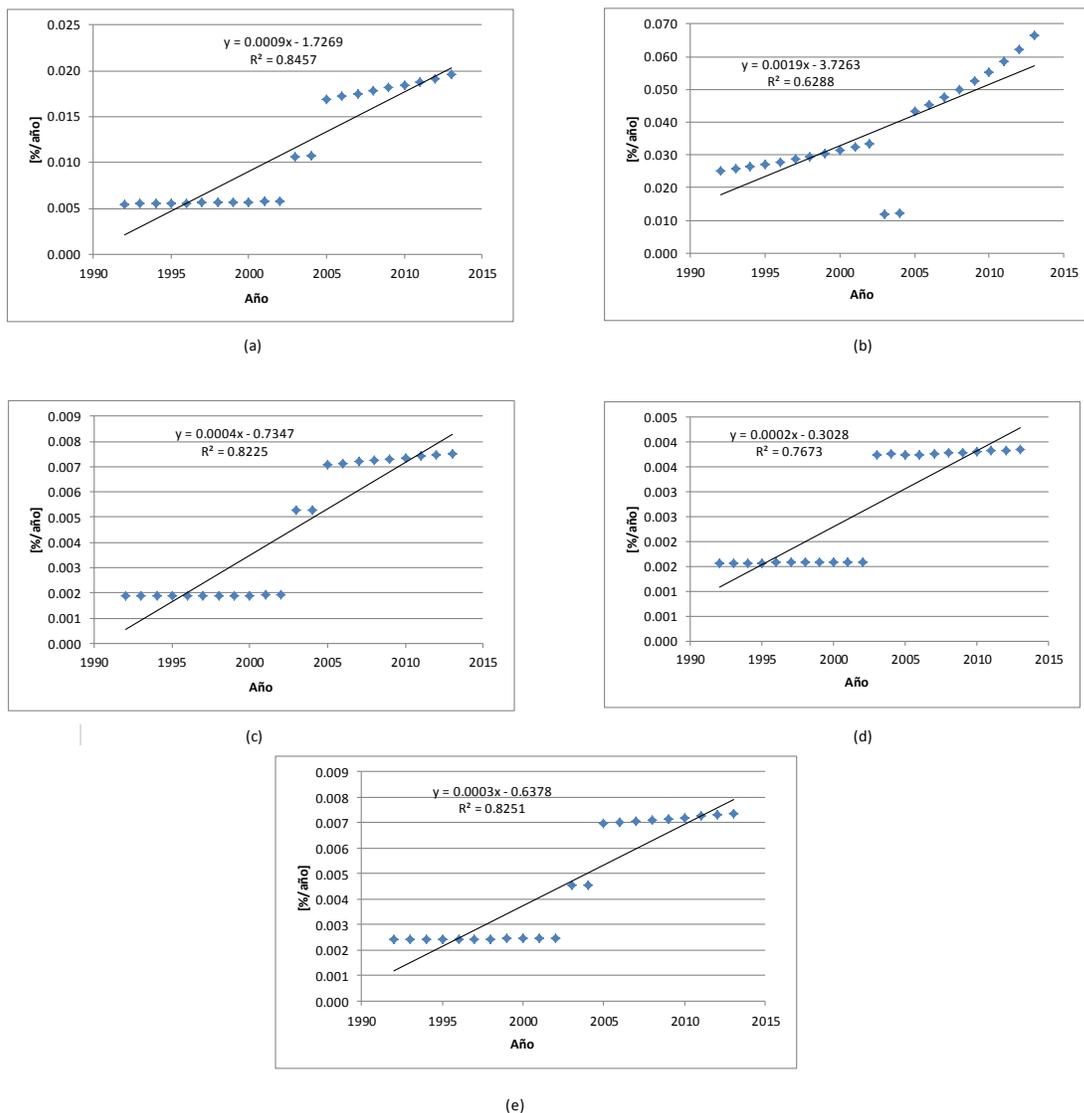


Figura 4-10 TAPAG entre los años 1991 y 2013 para los glaciares de la cuenca Olivares.

(a) Glaciar Olivares Alfa, (b) Restos del glaciar Olivares Alfa, (c) Glaciar Olivares Beta, (d) Glaciar Olivares Gamma y (e) Glaciar Juncal sur.

Al igual que en el escenario anterior se compara en la Tabla 4-9 los valores de las proyecciones para el año que existe medición (2013) y varios años hacia el futuro. En este escenario se dará la desaparición de algunos glaciares antes que otros, dado que es un estudio más en particular, en donde por ejemplo el glaciar Olivares Alfa según el método más crítico no tendría posibilidad de subsistir más allá de 30 a 35 años. En tanto para el glaciar Olivares Beta las proyecciones exponencial 1 y 2 no se ajustaron de ninguna forma, por lo que se omitieron durante los primeros 80 años de proyección, considerando que después de esta fecha el glaciar también debería considerarse derretido o no aportante. El valor de cada proyección según los años está compuesto por la suma de cada valor según la proyección en cada glaciar en particular.

Años	Valor medido	Promedio lineal	Tasa anual general	Proyección exponencial 1	Proyección exponencial 2	Tasa anual años 90
2013	47.50	47.255	53.419			47.429
2050	-	38.321	43.844			27.151
2100	-	30.089	34.431	14.298	14.458	8.417
2150	-	24.085	27.602	4.605	4.696	1.881
2170	-	22.093	25.372	4.524	4.614	0.987

Tabla 4-9 Proyección de área glaciar según distintos métodos entre el 2013 y el 2170 Escenario 2

Las comparaciones entre ambos escenarios se trataran más en detalle en el capítulo 4.6 sobre Cambio climático y escenarios del retroceso glaciar, así como también los supuestos respecto al resto de la masa de hielo que se encuentra en la cuenca.

### 4.3.2 Volumen Glaciar

El volumen glaciar es uno de los parámetros que más complicaciones trae estudiar, dada la topografía de la montaña y la imposibilidad de hacer un mapeo completo, así como las densidades del hielo que suelen ser distintas según el punto de medición. A consecuencia de esto último es que existen una serie de ecuaciones que intentan predecir el volumen según el área y el espesor. Una de estas ecuaciones es la propuesta por la DGA (GEOESTUDIOS-DGA, 2011) para glaciares de la zona del Aconcagua y río Blanco, en que el volumen es la multiplicación entre el área y el espesor, siendo el espesor determinado por la ecuación (4-5)

$$Espesor = 0.0465 * Area^{0.51402} \quad (4-5)$$

En donde tanto espesor como área esta expresado en metros cuadrados

Otra de las ecuaciones, es la propuesta por (CECS, 2013) en base a los estudios en la cuenca del Río Olivares. La ecuación (4-6) realiza una relación directa entre el área y el volumen en base a varios estudios con radar y perforaciones para medir densidad.

$$Volumen = 0.062 * Area - 0.02 \quad (4-6)$$

Al testear ambas ecuaciones con áreas y volúmenes conocidos se determinó que la ecuación (4-6) es la que representa mejor el volumen de los glaciares de la cuenca del río Olivares, dado los valores numéricos que se obtienen tienen bastante relación con los valores obtenidos de las

ecuaciones de Grinsted (Oberreuter et al., 2014) y con las mediciones existentes. Con respecto al funcionamiento de la ecuación (4-6) con los distintos escenarios, se estimó que al aplicar la ecuación a la suma de las áreas o a cada área de manera individual para el escenario 1 las variaciones son cercanas al 2% hasta el 2050, mientras que para el escenario 2 las variaciones alcanzan el 4.8%, siendo aceptable la diferencia para un estudio de este tipo. Para una proyección más extensa, las variaciones son más altas producto de que a bajas áreas (cercanas a 1) las diferencias porcentuales se elevan aunque sean numéricamente cercanas.

## 4.4 Precipitaciones y nieve

La precipitación es uno de los parámetros más importantes al momento de realizar la modelación, sin embargo al día de hoy no existen estaciones pluviométricas con una serie histórica importante en la cuenca del río Olivares, por lo que fue necesario buscar alternativas para representar de la mejor forma esta variable.

### 4.4.1 Precipitación

Dado que no existen estaciones dentro de la cuenca, se utilizaron estaciones cercanas y a diversas alturas para simular una serie de precipitaciones de una estación virtual en un punto intermedio de la cuenca. Las estaciones escogidas para el análisis fueron: Maitenes Bocatoma, San José de Maipo Retén, Riecillos, El Yeso embalse y terrazas oficinas centrales DGA. En la Figura 4-11 se puede ver la ubicación de estas con respecto a la cuenca de estudio.

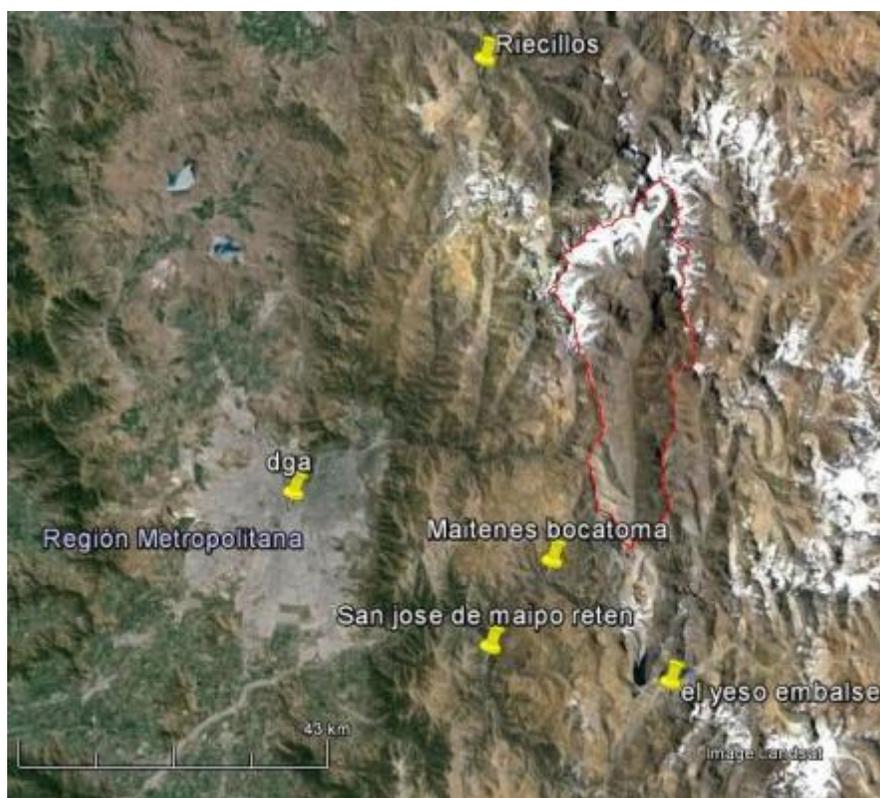


Figura 4-11 Ubicación de estaciones pluviométricas cercanas para estudiar la cuenca Olivares

Ocupando relleno estadístico (con el símbolo / R los valores que tienen relleno. Ver anexo de precipitaciones) para las estaciones que no se encuentran completas se obtiene la Tabla 4-10 que contiene los datos pluviométricos anuales en milímetros para cada una de las estaciones escogidas.

Año hidrológico	Estaciones [mm]				
	maitenes	Terrazas DGA	San José	Riecillos	Yeso
1991-1992	646.1 / R	392.1	761.5 / R	839.2	935
1992-1993	496.2 / R	406.3	564.5	564.5	628.5
1993-1994	493.3 / R	299.1	496	641.7	634.2
1994-1995	409.1 / R	262 / R	433.5 / R	344.1	549.6
1995-1996	261.6	190.2	333.6 / R	283.3 / R	379.9
1996-1997	184.1	188.2	233	203.7	167.8
1997-1998	970.0	742	1010	1035.4 / R	1222.7
1998-1999	112.2	127.5	144.5	105	202.9
1999-2000	327.2	359.8	393.5	437	496
2000-2001	625.5	496.5	734.5	682	1158.2
2001-2002	526.9	342.3	553.5	540.9	831
2002-2003	753.1	621.8	862.1	883.8	1254.7
2003-2004	311.5	242.2	379.5	340.6	506.3
2004-2005	390.3	386.5	459	476.6	503.6
2005-2006	733.7 / R	487.8	764.4	988.8	1186.6
2006-2007	418.3 / R	399.1	511	660.2	684
2007-2008	242.4 / R	193.2	304	411.9	502.6
2008-2009	531.6	362.6	690	747.3	935.2
2009-2010	430.8	285.9	574 / R	383.4	632.6
2010-2011	358.3	269.1	310.1	280.5	469.9
2011-2012	186.0	134.7	221.5	240.5	325.4
2012-2013	376.8	212.4	486	342.2	497.1
2013-2014	268.9	186.4	341.2	250.1	436.7
	Promedios				
	434.8	329.9	503.1	507.9	658.3

Tabla 4-10 Datos pluviométricos anuales en milímetros corregidos para las estaciones del caso de estudio

Para el caso del periodo seco, vale decir entre octubre y marzo, tomando en consideración todos los años hidrológicos se obtuvo para cada estación un promedio cercano al 10% de la precipitación total del periodo, vale decir entre los meses de abril y septiembre cae el 90% de la precipitación en la zona central y eso incluiría a la cuenca del Río Olivares.

#### 4.4.1.1 Estación Olivares (simulación)

La estación Olivares, corresponderá a una estación virtual recreada (su serie de precipitaciones) con una metodología en base a estaciones cercanas y ocupar un gradiente orográfico (ver Anexo

de precipitaciones). Se utilizan los datos reales de las estaciones Maitenes y El Yeso como base para generar una simulación de una estación virtual en la cuenca del Olivares. La estación Olivares se consideró en el punto medio de la cuenca a la cota 3678 msnm. En cada uno de los casos se aplicaron los factores de corrección a la estadística y al NC (número de corrección) y se obtuvieron los datos de la Tabla 4-11.

NC	733.12		325.35	
Altura	1143	3678	2553	3678
Año Hidrológico	Maitenes REAL [mm]	Olivares/maitenes [mm]	Yeso REAL [mm]	Olivares /yeso [mm]
1991-1992	646.2	1306.0	935.0	1227.8
1992-1993	496.2	1156.0	628.5	921.3
1993-1994	439.3	1099.1	634.2	927.0
1994-1995	409.1	1068.9	549.6	679.7
1995-1996	261.6	371.6	379.9	428.7
1996-1997	184.1	294.1	167.8	216.6
1997-1998	970.0	1629.8	1222.7	1515.5
1998-1999	112.2	222.2	202.9	251.7
1999-2000	327.2	620.4	496.0	626.1
2000-2001	625.5	1285.3	1158.2	1451.0
2001-2002	526.9	1186.7	831.0	1123.8
2002-2003	753.1	1412.9	1254.7	1547.5
2003-2004	311.5	604.7	506.3	636.4
2004-2005	390.3	1050.1	503.6	633.7
2005-2006	733.7	1393.5	1186.6	1479.4
2006-2007	418.3	1078.1	684.0	976.8
2007-2008	242.4	352.4	502.6	632.7
2008-2009	531.6	1191.4	935.2	1228.0
2009-2010	430.8	1090.6	632.6	925.4
2010-2011	358.3	651.5	469.9	600.0
2011-2012	186.0	296.0	325.4	374.2
2012-2013	376.8	670.0	497.1	627.2
2013-2014	268.9	378.9	436.7	485.5

Tabla 4-11 Resultados simulación de estación Olivares en base a estación Maitenes y El Yeso

En la mayoría de los casos los resultados estuvieron bastante cercanos entre sí. Las simulaciones se van turnando respecto a cuál sobrestima y cual subestima, por lo que se decidió calcular un promedio entre ambos resultados, el valor adecuado para la Estación Olivares se analizará en la calibración. En la Figura 4-12 se puede observar de mejor manera los datos de ambas simulaciones y el promedio de ambas en los años hidrológicos.

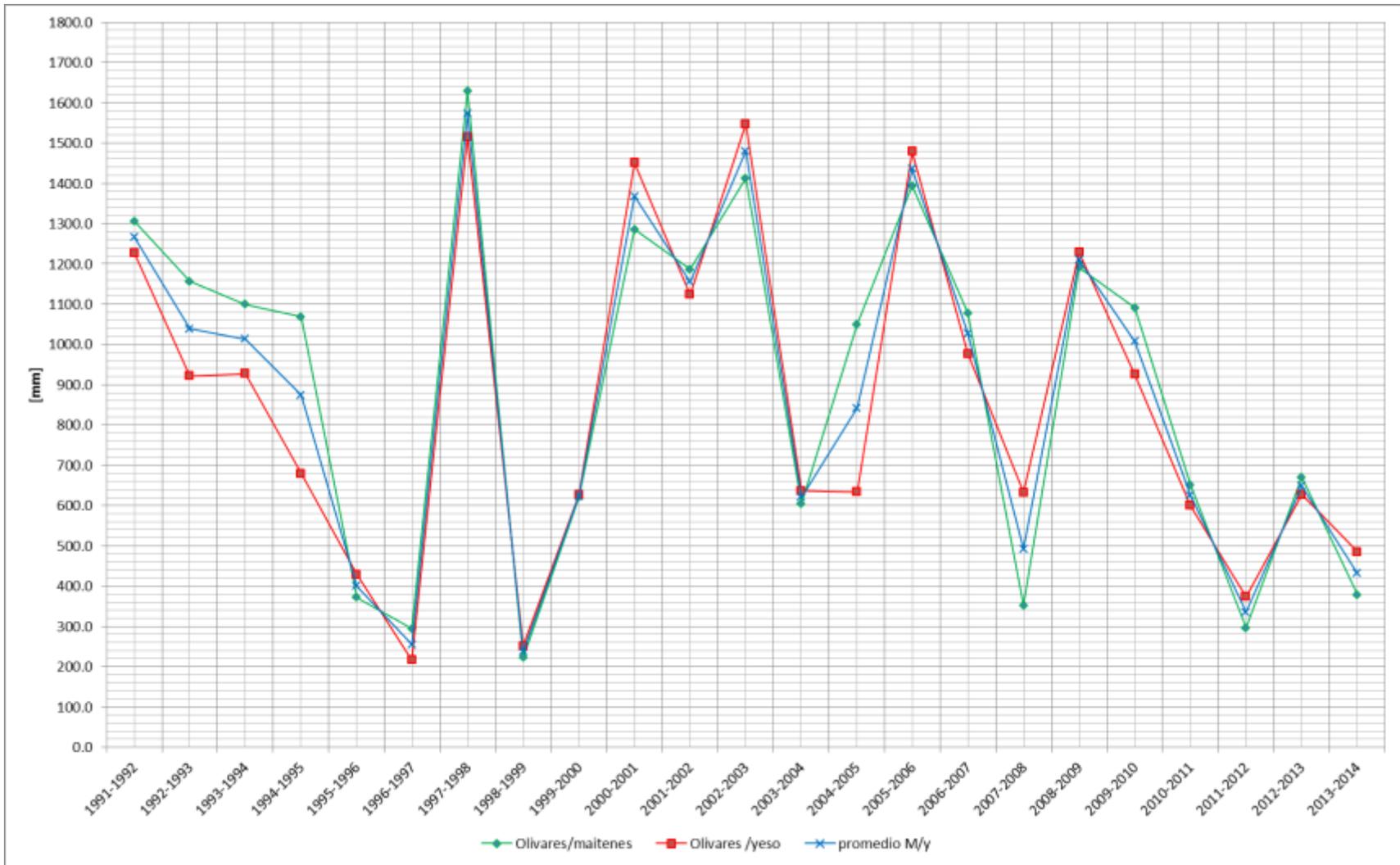


Figura 4-12 Simulación de precipitación para la estación virtual Olivares. Simulación en Base a estaciones Maitenes y Yeso y promedio de ambas simulaciones.

#### 4.4.2 Nieve

Una de las problemáticas que surge al analizar el problema de la precipitación tiene que ver con la cobertura nival. La precipitación no tiene un proceso de escurrimiento instantáneo o de corto tiempo, producto de la temperatura y la forma en que cae la precipitación (nieve).

La nieve tiende a mantenerse durante el invierno, cubriendo gran parte de la cuenca y transformándose en el principal sustento del recurso hídrico del río. La cobertura de nieve presente en la cuenca tiene un periodo de acumulación que comienza a finales de marzo en la parte más alta hasta fines de agosto y mitad de septiembre, cuando producto de las temperaturas y la entrada del periodo de deshielo comienza el periodo de derretimiento que culmina en marzo como representa la Figura 4-13 (Martínez, 2010).

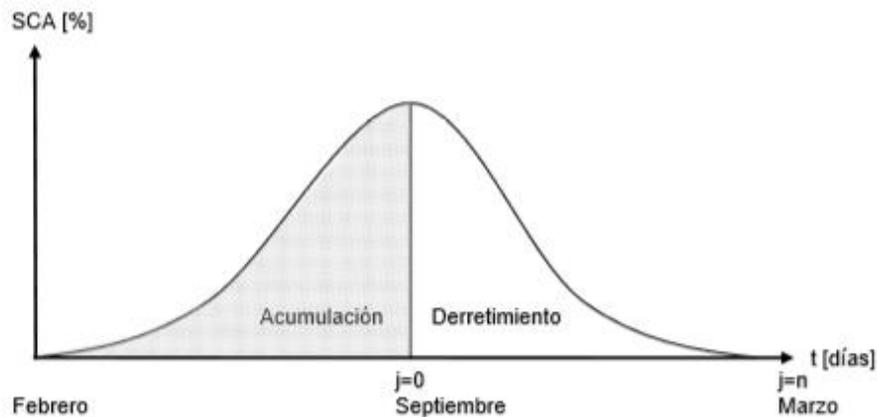


Figura 4-13 Representación de las etapas acumulación-derretimiento.

Si se considera que toda la nieve se derrite en los años considerados normales y secos (vale decir, años en que no hay acumulación en glaciares), entonces para el cálculo del caudal anual se podrán reducir las variables, ya que la cantidad de precipitación caída saldrá de la cuenca en el intertanto del año hidrológico, aunque esta se haya producido mayoritariamente en el periodo de invierno. En el caso del periodo seco, existirán dos componentes para la precipitación, la que corresponde a la precipitación en ese periodo que se supone será líquida o que si es sólida se derretirá en el transcurso del periodo octubre-marzo y la segunda componente que corresponderá al caudal producido por la nieve que cayó durante el periodo de invierno y que se está derritiendo en el periodo seco.

Para el cálculo de estas componentes es necesario determinar en qué momento se está considerando nieve y precipitación líquida. Para esto es necesario determinar la isoterma cero en la cuenca. La isoterma cero en el sector de la región metropolitana para el periodo de invierno se encuentra alrededor de los 3000-3200 msnm (Bustos, 2011) (Pérez, 2011) , una vez encontrada la isoterma cero se puede determinar la línea de nieve (Garreaud, 1992) y llegar a un valor de línea

de nieve para el sector del Olivares de 2500 msnm en promedio con un periodo de retorno de 2 años (Pérez, 2011).

#### 4.5 El Modelo y sus parámetros

Para realizar el modelo con todos sus parámetros se debe considerar los escenarios importantes, que tendrán iguales parámetros pero con distintos valores. Estos dos escenarios son el balance anual y el balance en el periodo de deshielo. Para ambos casos se puede considerar un esquema como el de la Figura 4-14 en que tenemos variables de entrada y salida correspondientes a toda la cuenca como el sistema.

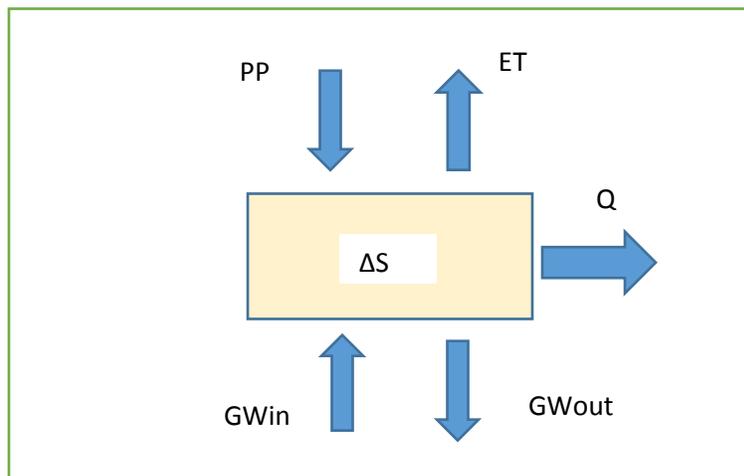


Figura 4-14 Esquema del balance hídrico del modelo de la cuenca

El caudal de salida será igual al balance de todos los factores según la ecuación

$$Q = \Delta S + PP - ET + GWin - GWout \quad (4-7)$$

En donde PP representa la entrada de precipitación en toda la cuenca, sea esta en forma de precipitación o en forma de nieve. Las entradas *GWin* y salidas *GWout* de aguas subterráneas son descartadas productos de los antecedentes vistos en el capítulo “3.3 Características geológicas”. La salida de evaporación tendrá componentes de evaporación en el río, el suelo desnudo, la superficie vegetal y por sublimación.  $\Delta S$  representa el cambio volumétrico anual de un glaciar expresado en agua equivalente. Ahora bien, es necesario adaptar esta última ecuación, ya que parte de este cambio volumétrico glaciar corresponderá a sublimación..

Con todo lo anterior la ecuación (4-7) queda de la siguiente forma:

$$Q = \Delta S' + PP - ET_r - ET_s - Sub \quad (4-8)$$

En donde la evaporación queda como Evaporación desde el río, evaporación desde el suelo y cubierta vegetal. Además el termino  $\Delta S$  ahora pasa a ser  $\Delta S'$  que corresponde al cambio volumétrico que no es sublimación y  $Sub$  que aparece como parte de las salidas que corresponde a la sublimación desde el hielo y la nieve.

Tanto la ecuación (4-7) como la ecuación (4-8) son representantes de un modelo conceptual que se debe adaptar a la realidad tanto en sus unidades como parámetros. Al realizar esta modificación se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q = \Delta V - \Delta V * Sub + pp * A_{gl} - pp * A_{gl} * Sub + pp * A_{sd} - A_r * ET_r - A_{sd} * ET_s \quad (4-9)$$

En donde cada parámetro y concepto implica:

$\Delta V =$  diferencia anual de volumen glaciar.

$\Delta V * Sub =$  Es la diferencia anual de volumen glaciar que se pierde por sublimación

$A_{gl} =$  Area glaciar

$pp * A_{gl} =$  precipitación que cae sobre los glaciares en forma de nieve

$pp * A_{gl} * Sub =$  precipitaciones en forma de nieve que se pierde por sublimación

$A_{sd} =$  Area de la cuenca que no contiene glaciares

$pp * A_{sd} =$  Precipitación sobre el area de la cuenca sin glaciares

$A_r =$  Area del río

$A_r * ET_r =$  Evaporación desde la superficie del río

$A_{sd} * ET_s =$  Evaporación desde el suelo que no contiene glaciares

Si se define  $Nsub = (1 - sub)$ , la porción no sublimada se pueden reagrupar los términos de la ecuación (4-9) y obtener lo siguiente:

$$Q = \Delta V * Nsub + pp * A_{gl} * Nsub + pp * A_{sd} - A_r * ET_r - A_{sd} * ET_s \quad (4-10)$$

Si  $A_{sd} = (A_t - A_{gl})$ , en donde  $A_t$  corresponde al área total podemos volver a reagrupar la ecuación (4-10) para obtener una expresión que en términos de áreas variables dependa solo del área glaciar y la otra área corresponda a un valor constante. Obtenemos entonces la ecuación (4-11):

$$Q = (\Delta V + pp * A_{gl}) * Nsub + (A_t - A_{gl}) * (pp - ET_s) - A_r * ET_r \quad (4-11)$$

Esta última expresión considera el caudal en el periodo de un año, por lo que es necesario extenderla hacia "n" periodos o "n" años según sea la definición de la expresión tomando en consideración lo sucedido los años anteriores, para lo cual es necesario introducir la TAPAG en la ecuación mediante el parámetro de área glaciario que es el que está relacionado directamente.

La definición de la TAPAG para un primer periodo es:

$$\gamma_1 = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \quad (4-12)$$

Al reagrupar términos en la ecuación (4-12) obtenemos lo siguiente:

$$\begin{aligned} A_1 &= A_0 * (1 - \gamma_1) \\ \Rightarrow A_2 &= A_1 * (1 - \gamma_2) \\ \Rightarrow A_2 &= A_0 * (1 - \gamma_1) * (1 - \gamma_2) \end{aligned}$$

Entonces

$$\begin{aligned} A_2 &= A_0 * \prod_{i=1}^2 (1 - \gamma_i) \\ A_n &= A_0 * \prod_{i=1}^n (1 - \gamma_i) \end{aligned} \quad (4-13)$$

La ecuación (4-13) permite identificar el área glaciario para cualquier periodo o año según la forma en la cual se maneje la ecuación, si el vector de entrada para la TAPAG va desde 1991 a 2050, entonces el índice de la pitatoria debería tener un rango  $i = \{1991, 2050 / i \in \mathbb{N}\}$ . Para que tenga sentido físico la ecuación (4-13) es necesario que el índice comience en  $i=2$ , dado que la relación de diferencia de áreas no se puede evaluar en  $i=1$  si no existe un  $i=0$ .

Una vez identificada la relación de la TAPAG es necesario introducir en el modelo la relación entre el volumen y el área de la ecuación (4-6) realizando una modificación para obtener unidades en metros.

$$V_1 = 0.062 * A_{gl1} - 0.02$$

$$\Delta V_2 = V_2 - V_1$$

$$\begin{aligned} & \Rightarrow \Delta V_n = V_n - V_{n-1} \\ & \Rightarrow \Delta V_n = 0.062 * (A_{gln} - A_{gln-1}) * 10^9 \end{aligned} \quad (\text{De km a m})$$

Entonces

$$\beta = \frac{\Delta V_n}{\Delta A_{gln}} = 6.2 * 10^7 \quad (4-14)$$

Se define  $\beta$  como la relación entre las diferencias anuales del volumen en el área. El término relacionado con las diferencias de las áreas se puede expresar en función de la ecuación (4-13) de tal forma que queda lo siguiente:

$$\begin{aligned} \Delta A_{gln} &= A_{gln} - A_{gln-1} \quad (4-15) \\ \Rightarrow \Delta A_{gln} &= A_0 * \prod_{i=2}^n (1 - \gamma_i) - A_0 * \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \gamma_i) \end{aligned}$$

Entonces

$$\Delta A_{gln} = -A_0 * \gamma_n * \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \gamma_i) \quad (4-16)$$

Al relacionar la ecuación (4-14) con la ecuación (4-16) se obtiene:

$$\Delta V_n = -\beta * A_0 * \gamma_n * \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \gamma_i) \quad (4-17)$$

Que corresponde a la expresión que relaciona la diferencia de volumen en el tiempo con el área. Esta expresión es negativa producto del supuesto de que los glaciares están siempre en retroceso según la ecuación (4-15), pero si en esta ecuación el área  $n+1$  fuese mayor que  $n$ , entonces la diferencia de volumen sería positiva.

Al combinar las ecuaciones (4-11), (4-13), (4-17) se obtiene una expresión para cualquier caudal anual en el periodo de estudio que tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned} Q_n &= \left[ \beta * A_{glo} * \gamma_n * \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \gamma_i) + pp_n * A_{glo} * \prod_{i=2}^n (1 - \gamma_i) \right] * Nsub \\ &+ \left[ A_t - A_{glo} * \prod_{i=2}^n (1 - \gamma_i) \right] * (pp_n - ET_s) - A_r * ET_r \end{aligned} \quad (4-18)$$

Para el caso del periodo de deshielo entre los meses de octubre y marzo, la ecuación (4-18) también se puede utilizar con la diferencia de que el caudal final debe ser considerado para el

periodo de 6 meses y no de 12 meses, además de adaptar los valores de precipitación y sublimación.

Al realizar esta adaptación para el periodo de deshielo podemos reordenar la ecuación (4-10) y (4-11) incluyendo un término correspondiente a lo determinado en el anexo de precipitación y nieve. Finalmente la ecuación para el periodo de deshielo es de la siguiente forma:

$$Q_n = \left[ \beta * A_{glo} * \gamma_n * \prod_{i=1}^{n-1} (1 - \gamma_i) + pp_n * A_{glo} * \prod_{i=2}^n (1 - \gamma_i) \right] * N_{sub} \quad (4-19)$$

$$+ \left[ A_t - A_{glo} * \prod_{i=2}^n (1 - \gamma_i) \right] * (pp_n - ET_s) - A_r * ET_r - P_{sn} * A_t * 0.113$$

En donde  $P_{sn}$  es el valor correspondiente de la ecuación (8-16).

## 4.6 Cambio climático y escenarios del retroceso glaciar

El cambio climático y eventualmente otros factores externos afectarán la tasa a la cual se produce el retroceso glaciar. En los capítulos anteriores se vieron varios supuestos de cómo podría evolucionar la TAPAG, siendo los valores más sobreestimados los producidos por un valor constante de TAPAG, ya que no representa cambios producto de factores como el cambio climático u otros.

Para el análisis se toman las proyecciones del método de “tasa anual años 90” en ambos escenarios dado que representan mejor los efectos del cambio climático para el escenario RCP 8.5. Para la representación del escenario RCP 2.6 se ocupa el método de “promedio lineal”. A modo de comparación, también se realizan proyecciones ocupando los métodos exponenciales pero bajo características climáticas del RCP 8.5 para comparar la sensibilidad del modelo bajo diferentes métodos de proyección de la TAPAG en los dos escenarios analizados.

La elección del método se basa en los resultados obtenidos que tienen consistencia con otros estudios recientes que proyectan la desaparición de importantes glaciares en el ártico canadiense hacia finales del siglo 21 producto del aumento de la temperatura y el aumento de la tasa de deshielo (Lenaerts, et al., 2013).

Para todos estos efectos, se agregan las masas de hielo (Tabla 4-7) que pertenecen a la cuenca, pero que no son parte de la zona principal de estudio, aplicándose las fórmulas obtenidas para los glaciares de estudio. Dado que estas masas de hielo no se encuentran agrupadas en un solo cúmulo al principio de la cuenca, su TAPAG deberá ser mayor, por lo que se aplica un factor de aumento de retroceso basado en los datos de imágenes satelitales que muestran una disminución más rápida que los glaciares de la parte alta de la cuenca. Cambio climático y parámetros del modelo

Los efectos que producirá el cambio climático, serán según los escenarios bajo los cuales se plantea el mismo. Para el análisis en el escenario RCP 2.6, no debería haber cambios en las

variables, por lo que se puede considerar que los valores de los parámetros se mantienen en el tiempo sin mayores fluctuaciones, sin embargo, al realizar un análisis para el escenario RCP 8.5 que es el caso más extremo, los parámetros deben necesariamente variar.

En el “Capítulo 2.3 Cambio climático”, se determinó que para el escenario más extremo las temperaturas subirán en promedio 1 °C, mientras que las precipitaciones disminuirán cerca del 10%, sin embargo estos valores corresponden a promedios de la zona, por lo que los cambios en estos parámetros deberían ser un poco más abultados para estar en concordancia con el supuesto de cambio climático.

#### **4.6.1 Temperatura**

La temperatura afecta principalmente al parámetro de evaporación y de sublimación. Estos dos parámetros son afectados de manera directa, mientras que la TAPAG es afectada de manera indirecta y dentro de su génesis está incluida la temperatura.

Con respecto a la evaporación, se rehace el cálculo mediante los métodos vistos previamente, estableciendo un cambio de la temperatura entre el periodo 2040 y 2070 según un modelo de predicción de cambio climático (Serrano, 2014), esto lleva a obtener un valor anual para la evaporación.

Un proceso similar se debe realizar para la sublimación, sin embargo como este es un parámetro sacado desde una fuente bibliográfica, se hace el supuesto que la sublimación aumentará hasta llegar a 1 a 2 puntos porcentuales más de lo ya visto en el “Capítulo 4.1.1 Sublimación”.

El aumento total de la temperatura en algunos estudios para un RCP 4.5 hasta el 2100 se ha modelado hasta en 8 grados por sobre el actual en masas glaciares del ártico (Lenaerts, et al., 2013), sin embargo esto es solo a modo de referencia, dado que no es un escenario que se este utilizando en este estudio, por lo que es necesario contar con bibliografía local. En estudios realizados en la zona central del país modelando efectos que podría tener el cambio climático se propusieron aumentos puntuales de temperatura de hasta 10 grados (Cortés, 2010). Tomando en consideración estos antecedentes, para este estudio se consideraron aumentos en la temperatura de hasta 2 grados en promedio para el periodo 2040-2070 y serán implementados con la serie de temperaturas de modelos de predicción climática (Serrano, 2014)

#### **4.6.2 Tasa retroceso**

Para el parámetro TAPAG se utilizaron los escenarios vistos en los capítulos anteriores, en que se hace el supuesto de que los métodos con resultados más extremos serían los escenarios más similares al escenario RCP 8.5, mientras que un aumento en la tasa de manera constante representaría un escenario RCP 2.6 de cambio climático.

### **4.6.3 Precipitación**

Para el caso de la precipitación, en el capítulo 2 se determinó una disminución de hasta 10% al año 2050 en el caso RCP 8.5, considerando este antecedente, la precipitación con series de datos generados por modelos de predicción de cambio climático (Serrano, 2014).

Otra de las variables que afecta la precipitación para distinguirla como nieve o como precipitación líquida será el aumento de la línea de nieve. Algunas publicaciones estiman un aumento de la isoterma cero en Chile central para el periodo 2070-2100 entre los 440-350 metros según el escenario (Carrasco, Casassa, & Quintana, 2005), por lo que para este estudio se consideró un aumento de 400 metros de la isoterma cero para el escenario RCP 8.5, lo que supone conllevará a un aumento en la misma cantidad de la línea de nieve. Este aumento se hará lineal hasta el año 2070.

## **5. Calibración y validación del modelo**

### **5.1 Datos a utilizar**

Los datos utilizados para la calibración y validación del modelo vienen dados por los antecedentes expuestos en los capítulos anteriores. Cada parámetro es llevado a unidades equivalentes para obtener  $\text{m}^3/\text{año}$  para cada año hidrológico.

La calibración y validación se realizó con los datos que se tienen de la cuenca, puesto que es necesario 18 años para calibrar y 5 años para validar la información como mínimo (Universidad de Chile, 2011).

Una vez realizada la calibración y validación se procedió a realizar la proyección hacia el año 2050.

### **5.2 Simulación en bruto (sin calibración)**

Para la simulación en bruto, se usan los datos del capítulo 4 y las ecuaciones del mismo capítulo. La idea fue obtener resultados preliminares de caudal no calibrados para tomar decisiones sobre los mismos y proceder a la calibración. Se utilizan los casos base, periodo de deshielo y el periodo anual.

#### **5.2.1 Periodo Anual**

En el caso del periodo anual se obtiene 3 caudales correspondientes a 3 casos de precipitaciones. Al observar los resultados de la Tabla 5-1 se concluyó para hacer la calibración:

- La simulación debe tomar en consideración que no pueden existir valores negativos de caudal, vale decir, es necesario considerar que las salidas como evaporación no pueden ser mayores a la precipitación.
- Hay que buscar ajustes para años especialmente lluviosos y para años que representen sequía.

	Q/promedio [Millones m3/año]	Q/Maitenes [Millones m3/año]	Q/El Yeso [Millones m3/año]	Q/ Observado [Millones m3/año]
1991-1992	387.26	406.82	367.70	519.72
1992-1993	264.68	323.42	205.94	291.40
1993-1994	251.65	294.74	208.55	340.32
1994-1995	181.91	279.41	84.41	258.45
1995-1996	-56.05	-70.38	-41.73	233.66
1996-1997	-129.05	-109.62	-148.47	176.78
1997-1998	531.58	560.25	502.90	326.68
1998-1999	-139.09	-146.50	-131.67	232.51
1999-2000	54.57	53.14	56.00	195.04
2000-2001	428.56	386.93	470.20	343.01
2001-2002	321.39	337.20	305.58	287.08
2002-2003	484.66	450.81	518.51	356.76
2003-2004	53.72	45.75	61.69	260.03
2004-2005	164.83	269.64	60.01	228.41
2005-2006	475.26	453.62	496.89	396.85
2006-2007	268.87	294.40	243.35	287.71
2007-2008	-1.20	-71.89	69.48	240.55
2008-2009	360.12	350.88	369.35	286.29
2009-2010	258.00	299.69	216.31	244.07
2010-2011	64.62	77.63	51.61	191.71
2011-2012	-82.72	-102.48	-62.95	205.32
2012-2013	75.26	86.08	64.44	201.57
2013-2014	-34.66	-61.63	-7.70	209.29

*Tabla 5-1 Caudales simulados sin calibración versus el caudal observado de la cuenca para el periodo 1991-2014*

Se analizó la relación entre los caudales generados por las 3 series de precipitación versus el caudal observado y se obtuvo un porcentaje de diferencias. Cuando el porcentaje es positivo es porque existe una subestimación de la precipitación, mientras que cuando el porcentaje es negativo, es porque existe una sobre estimación de los caudales. Los resultados se señalan en la Tabla 5-2 y solo son la transformación de los datos de la Tabla 5-1 a valores porcentuales. La idea de esta comparación fue identificar los aspectos más críticos que sirvieron para calibrar el sistema.

Las conclusiones de la Tabla 5-2 son las siguientes:

- La simulación en base a la estación Los Maitenes tiene una mejor representación de la realidad, teniendo 11 valores dentro del margen estipulado en esta etapa, versus los 8 de la simulación en base al promedio y los 4 de la simulación en base a la estación el yeso.
- Salvo el año hidrológico 1997-1998 y 2002-2003, todos los años considerados normales estuvieron dentro del margen establecido. Los años normales para esta estación

considerando sus características geográficas se definieron como los años con más de 650 mm caídos en el año hidrológico.

- Los años hidrológicos 1997-1998 y 2002-2003 corresponden a eventos de mucha precipitación y con un periodo de retorno muy alto. Existe una sobre estimación para ambos casos.
- Existe una subestimación en los años secos, por lo que es necesario ajustar los parámetros que general el caudal para valores inferiores a los 650 mm.

	Qreal/ Qpromedio [%]	Qreal/ QMaitenes[%]	Qreal/ QEIYeso [%]	Tipo de año
1991-1992	24.91	21.11	28.71	normal
1992-1993	8.53	-11.83	28.89	normal
1993-1994	25.55	12.76	38.34	normal
1994-1995	29.22	-8.89	67.32	normal
1995-1996	124.56	130.75	118.37	Seco
1996-1997	174.17	163.07	185.27	Seco
1997-1998	-64.10	-72.97	-55.24	normal
1998-1999	160.75	163.97	157.53	Seco
1999-2000	72.14	72.88	71.40	Seco
2000-2001	-25.96	-13.70	-38.22	normal
2001-2002	-12.80	-18.36	-7.24	normal
2002-2003	-36.99	-27.41	-46.57	normal
2003-2004	79.43	82.53	76.33	Seco
2004-2005	27.46	-18.89	73.80	normal
2005-2006	-20.73	-15.22	-26.23	normal
2006-2007	5.92	-3.04	14.88	normal
2007-2008	100.87	130.54	71.19	Seco
2008-2009	-26.73	-23.48	-29.99	normal
2009-2010	-6.40	-23.66	10.85	normal
2010-2011	66.40	59.55	73.25	Seco
2011-2012	141.10	150.82	131.38	Seco
2012-2013	62.71	57.29	68.13	Seco
2013-2014	117.13	130.14	104.11	Seco

Tabla 5-2 Relación porcentual entre caudales no calibrados y caudal promedio anual observado para el periodo 1991-2014

En el Figura 5-1 se muestran los caudales generados por las series de precipitaciones y el caudal observado:

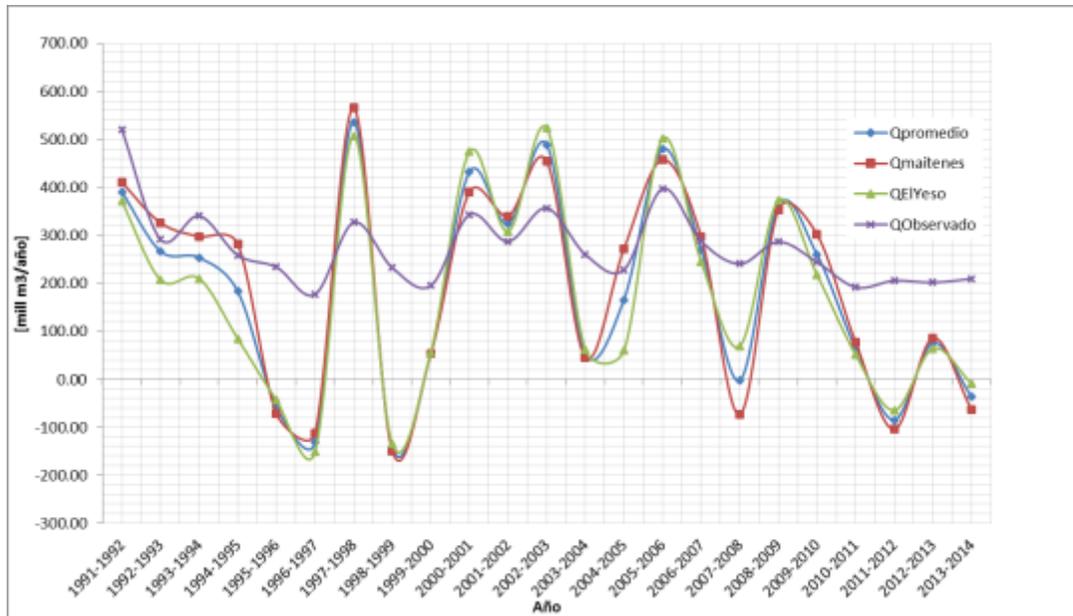


Figura 5-1 Caudales simulados sin calibración versus el caudal observado de la cuenca para el periodo 1991-2014

### 5.2.2 Periodo de deshielo

Al realizar el caso del análisis para el periodo de deshielo, existen problemas similares al caso del periodo anual, en la Tabla 5-3 se señalan los caudales generados por 3 series de precipitaciones y el caudal observado durante el periodo de estudio.

	Q/promedio [mill m3/año]	Q/maitenes [mill m3/año]	Q/El yeso [mill m3/año]	Q/ Observado [mill m3/año]
1991-1992	375.63	394.30	356.96	455.60
1992-1993	258.30	314.35	202.26	211.90
1993-1994	245.83	286.93	204.74	247.07
1994-1995	179.32	272.26	86.38	193.33
1995-1996	-47.43	-61.08	-33.79	170.77
1996-1997	-116.87	-98.36	-135.37	128.04
1997-1998	512.18	539.48	484.88	269.00
1998-1999	-126.20	-133.25	-119.14	166.67
1999-2000	58.13	56.77	59.49	150.91
2000-2001	413.78	374.19	453.37	287.78
2001-2002	311.81	326.84	296.78	221.22
2002-2003	466.86	434.69	499.02	284.63
2003-2004	57.55	49.97	65.12	200.39
2004-2005	163.06	262.56	63.55	168.41
2005-2006	458.10	437.57	478.63	324.38
2006-2007	262.24	286.45	238.02	203.48
2007-2008	6.14	-60.88	73.16	174.38
2008-2009	348.65	339.90	357.40	218.37
2009-2010	251.85	291.35	212.35	175.61
2010-2011	68.70	81.02	56.38	121.06
2011-2012	-70.72	-89.43	-52.01	155.67
2012-2013	78.87	89.11	68.63	146.33
2013-2014	-25.06	-50.56	0.45	161.98

*Tabla 5-3 Caudales simulados sin calibración versus el caudal observado de la cuenca para el periodo de deshielo entre los años 1991-2014*

Las principales observaciones son:

- Algunos valores de caudal dan negativo, esto debido a que hay una sobreestimación de la evaporación en la zona.
- Los años más secos son los que necesitan mayor calibración en conjunto con los extremadamente lluviosos.
- La estación promedio de lo obtenido con Los Maitenes y El Yeso, es la que se comporta mejor en términos de estimación, seguida de la estación El Yeso.

Con caudales de la Tabla 5-3 se obtiene la relación porcentual entre los caudales, con lo que se generó la Tabla 5-4.

	Qreal/ Qpromedio [%]	Qreal/ QMaitenes[%]	Qreal/ QEIYeso [%]	Tipo de año
1991-1992	17.55	13.46	21.65	Normal
1992-1993	-21.90	-48.35	4.55	Normal
1993-1994	0.50	-16.13	17.13	normal
1994-1995	7.24	-40.83	55.32	normal
1995-1996	127.78	135.77	119.78	seco
1996-1997	191.27	176.82	205.72	seco
1997-1998	-90.40	-100.55	-80.25	normal
1998-1999	175.72	179.95	171.48	seco
1999-2000	61.48	62.38	60.58	seco
2000-2001	-43.78	-30.02	-57.54	normal
2001-2002	-40.95	-47.74	-34.16	normal
2002-2003	-64.02	-52.72	-75.32	normal
2003-2004	71.28	75.06	67.50	seco
2004-2005	3.18	-55.90	62.26	normal
2005-2006	-41.22	-34.89	-47.55	normal
2006-2007	-28.88	-40.78	-16.98	normal
2007-2008	96.48	134.91	58.05	seco
2008-2009	-59.66	-55.65	-63.67	normal
2009-2010	-43.42	-65.91	-20.92	normal
2010-2011	43.25	33.08	53.43	seco
2011-2012	145.43	157.45	133.41	seco
2012-2013	46.10	39.11	53.10	seco
2013-2014	115.47	131.22	99.72	seco

Tabla 5-4 Relación porcentual entre caudales no calibrados y caudal observado para el periodo 1991-2014 en el periodo de deshielo

En el Figura 5-2 se muestran los caudales generados por las series de precipitaciones y el caudal observado:

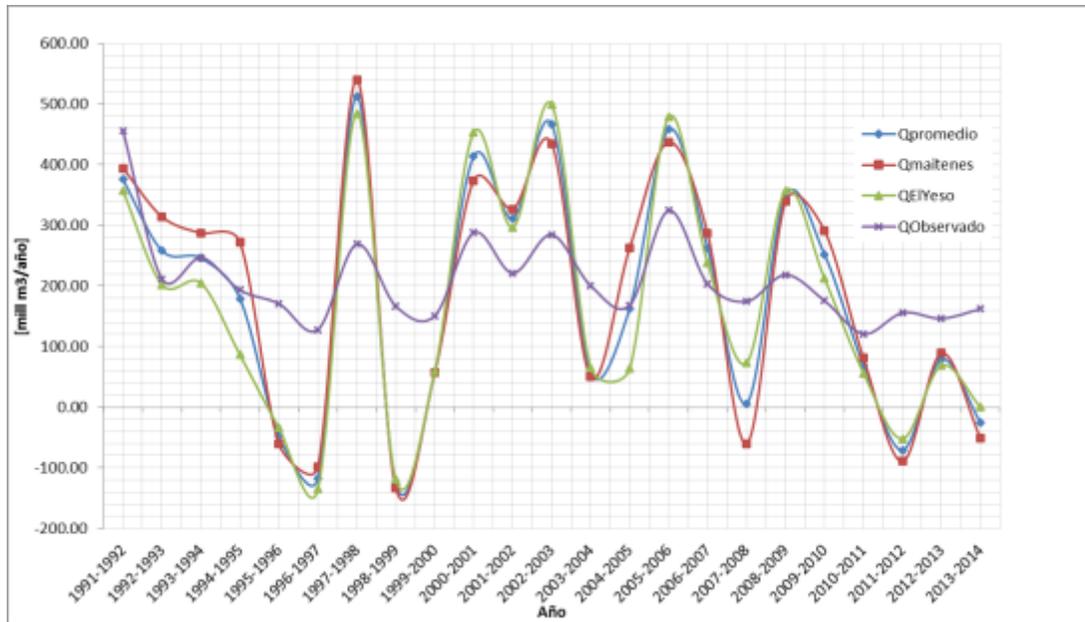


Figura 5-2 Caudales simulados sin calibración versus el caudal observado de la cuenca para el periodo de deshielo entre los años 1991-2014

En la mayoría de los casos existe una subestimación de la precipitación acumulada. Las opciones de corrección son fueron variadas, desde la línea de nieves hasta el ajuste porcentual de la cantidad de caudal que sale de la cuenca en el periodo de deshielo, que en general es cercano al 75% del caudal de todo el año, sin embargo, antes de calibrar el periodo de deshielo fue necesario calibrar el periodo anual y en base a ese resultado, se hicieron los ajustes correspondientes para el periodo de deshielo. La calibración es fundamentalmente el ajuste de los diversos parámetros que se detallan en los capítulos siguientes y el modo de comparación es el resultado del caudal simulado versus el caudal observado.

### 5.3 Análisis de sensibilidad

Al realizar un análisis de sensibilidad para el periodo anual, se tomaron en consideración las variables de precipitación, sublimación y evaporación. Los demás parámetros respecto a retroceso glaciar decidieron dejarse fijos ya que corresponden a mediciones en terreno y con vuelos aéreos. Aunque no existe seguridad respecto a la forma en como fue retrocediendo la masa glaciar entre los años que no hubo mediciones, establecer un cambio en los datos es totalmente ficticio, por lo que se analizaron los datos que si pueden tener una variabilidad justificable.

En el caso de la evaporación, la variable que corresponde a la de ríos y lagos al ser cercana a los 0.4 millones de  $m^3/año$ , no es muy influyente en términos de sensibilidad para el modelo, cuando los valores de caudal están siempre cercanos a los cientos de millones. En el caso de la evaporación desde el terreno, se realizaron 250 simulaciones con valores aleatorios de evaporación entre 0.1 -1 m/año, además se consideró un porcentaje aleatorio de la evaporación en el caso de que esta variable fuese mayor a un 65% de la precipitación (Kalthoff, et al. , 2006). La sensibilidad de esta variable resulto ser bastante alta, teniendo cambios, en los términos de la

Tabla 5-4, que llegaron a máximos de 16 positivos para la simulación en base a la estación Maitenes, 13 positivos para la simulación en base al promedio y 14 positivos para la simulación en base a la estación El Yeso, en donde los “n positivos” corresponden a valores aceptables (diferencias de no más del 25% con el caudal observado) de caudal, estos valores fueron definidos sobre la base de diferencias no mayores a  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esta primera aproximación sin ajustar los otros parámetros da una visión de lo importante que es esta variable para la cuenca. Mas adelante en la calibración, se señalan patrones de ajuste más estrictos tanto en la diferencia porcentual como en las diferencias en  $\text{m}^3/\text{s}$ .

En el caso de la sublimación, al ser una variable que tiene un medio siempre existente para ocurrir, el parámetro no puede cambiar tanto, por lo demás, al actuar en las ecuaciones, solo dentro de lo correspondiente a los glaciares, su sensibilidad es baja para el modelo. Un cambio de 4 puntos porcentuales en la sublimación conlleva a cambios de 1 o 2 puntos porcentuales en las simulaciones de caudales.

En el caso de la precipitación, la sensibilidad puede ser considerada alta producto de que es una variable crítica para el modelo, pero en términos prácticos el cambio en 1 mm produce cambios en promedio de 0.2 puntos porcentuales, vale decir de diferencias de un 25% podemos pasar a una diferencia de 24.8 % (diferencias entre el caudal simulado y el caudal observado) variando 1 mm la precipitación. Variando en 1 mm la precipitación, el máximo de variación obtenido en el caudal fue de 0.28 puntos porcentuales y el mínimo de 0.1 puntos porcentuales. Esto quiere decir que para disminuir diferencias de un 25% a un 15% entre el caudal simulado y el observado, se deben hacer cambios que impliquen aumentos o disminuciones de 50 milímetros en promedio.

En lo que respecta al caudal observado, una de las maneras de obtenerlo es mediante el promedio anual de la serie de medios mensuales que se tiene como estadística y con eso obtener el caudal en metros cúbicos para un año, sin embargo, si la variabilidad de los caudales fuese muy grande (en enero o diciembre la diferencia de caudales respecto a julio agosto es alta), entonces este valor puede no estar del todo correcto. Para el caso del periodo de deshielo, al transformar los caudales medios mensuales ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) a caudales promedio para cada mes ( $\text{m}^3/\text{mes}$ ) y sumar los meses correspondientes al periodo, las diferencias con los caudales obtenidos del promedio simple de los caudales medios mensuales de los 6 meses, fueron bajas. El porcentaje de diferencia en todos los casos fue menor al 1%. El promedio de las diferencias de las dos formas para el cálculo del caudal del periodo de deshielo fue de 0,30%, vale decir menor al 1%. En el caso del periodo anual la situación es similar obteniendo un promedio de 0,35%. Con esto se concluye que en términos de caudal los errores derivados de este ítem no tienen una sensibilidad importante a la hora de analizar los resultados.

## 5.4 Elecciones de parámetros

Una vez realizada la calibración se pasaron a corregir varios parámetros. Fundamentalmente las correcciones tienen que ver con ajustes en:

- Precipitación- sequía

- Evaporación
- Sublimación

La calibración se realizó para los primeros 18 años de la serie, tomando los últimos 5 para validación.

#### **5.4.1 Porción no sublimada de la ablación anual**

El valor definitivo no tuvo una gran variación producto de su poca influencia en términos de sensibilidad para con los resultados definitivos de caudal, de esta forma el nuevo valor calibrado se obtuvo gracias a que un ligero cambio ayudaba a dejar algunos valores dentro de rangos más aceptables y porque el nuevo valor no está por fuera de los márgenes posibles para la porción no sublimada. Con todo aquello el cambio de valor pasa a ser el siguiente:

$$0.943 \rightarrow 0.93$$

#### **5.4.2 Porción no sublimada de la ablación del periodo de deshielo**

Al igual que para el análisis del periodo anual el valor definitivo no tuvo una gran variación producto de su poca influencia en términos de sensibilidad para con los resultados definitivos de caudal. El nuevo valor para la porción no sublimada correspondiente al periodo de deshielo es:

$$0.9337 \rightarrow 0.9$$

#### **5.4.3 Evaporación en el área sin cobertura glaciar anual**

En el caso de la evaporación se determinó que en el caso de que exista una cantidad de humedad suficiente producto de la precipitación, entonces la evaporación podrá mantener los valores obtenidos por la investigación, ahora bien, en el caso de que no exista un valor de precipitación acorde a la evaporación, entonces es necesario aplicar algunos cambios. Gracias al análisis de sensibilidad, en el cual se realizaron más de 250 iteraciones aleatorias de valores de evaporación se determinó un porcentaje de la evaporación para casos más críticos de precipitación, vale decir, para año considerado seco se aplicó el condicional de solo restar a la precipitación el 28% de la evaporación. Para este caso en particular, el condicional se llevó a cabo siempre y cuando la evaporación fuese mayor a la precipitación. Los casos en que la precipitación y la evaporación eran similares, fueron observados para determinar cambios en el valor de la evaporación que permitieran mejores ajustes (menor diferencia porcentual entre el caudal simulado y el observado), pero finalmente se dejó en el valor determinado anteriormente por el estudio.

#### **5.4.4 Evaporación en el área sin cobertura glaciar en el periodo de deshielo**

Se ocupó el mismo procedimiento que para el caso anual, vale decir, verificar si existe una cantidad de humedad suficiente producto de la precipitación para darle viabilidad al modelo. Para este caso se realizaron nuevamente 250 simulaciones con iteraciones aleatorias con los nuevos parámetros y se determinó que el porcentaje de la evaporación para los casos más críticos de precipitación, años secos, será del 35%. Al igual que lo anterior, siempre y cuando el factor de la

evaporación fuese mayor al factor simulado de precipitación, se aplicó esta metodología de restar el valor correspondiente solo al 35% de la evaporación, justificándolo mediante el argumento de que para que exista evaporación es necesaria que exista materia evaporable.

Para ambos casos, anual y periodo de deshielo, el método resulta eficiente y permite simulaciones que se asemejan bastante a la realidad, sin embargo, al ser un algoritmo de estructura condicional de decisiones, puede suceder que los Inputs que están en el límite inferior y superior de decisión del algoritmo, generen outputs con mucha diferencia, a pesar de que entre los inputs no haya tanta diferencia. Por ejemplo que 300 mm de agua de como resultado 50 l/s y 301 de como resultado 100 l/s.

#### **5.4.5 Precipitación Periodo anual**

Una vez determinada la estación Maitenes como el mejor predictor de la cuenca Olivares, se llevó a cabo una calibración de los datos de la Estación Olivares en base a los Maitenes con especial énfasis en los años extremadamente lluviosos y en los años más húmedos.

Se creó una precipitación de referencia que represente la variabilidad de la cuenca. Se creó una nueva serie de datos (precipitación de referencia) que se transformaron en los parámetros de la ecuación para obtener caudales simulados. Esta nueva serie de datos no implica necesariamente ser la nueva serie de datos de la precipitación representativa de la cuenca, sino que es una adaptación de las condiciones de la cuenca bajo ciertos contextos meteorológicos e hidrológicos. Dentro de las determinaciones que se tomaron están las siguientes:

- En el caso de un año en extremo lluvioso, un cierto porcentaje pasara a ser “contribuyente del caudal” del próximo año. Esto, fundamentado en que pudiese no derretirse toda la nieve dado el gran inesperado volumen de ese año en particular.
- En el caso de un año considerado seco, menor a 680 mm anuales, entonces se considera que existe hay una subestimación del valor, dado que en la alta cordillera cae más precipitación que en las cuencas y valles, por lo que se pondera el valor por un cierto factor.
- En el caso de años mayores a 1000 mm, se considera que puede existir una sobreestimación, por lo que se pondera por 0.9 para ajustar los valores.
- Se considera también el intervalo entre los 1200 y los 1500 mm de lluvias del año anterior como un año lluvioso, por lo que se deja un porcentaje para “contribuir al siguiente año”, aunque menor al caso extremo lluvioso.

El problema de aplicar un condicional, es el cuidado que se debe tener con la determinación de la línea entre un “si cumple” y un “no cumple”, ya que genera cambios importantes en el resultado. La determinación de ese número se llevó a cabo mediante la prueba de varios datos e iteraciones posibles hasta llegar al mejor ajuste entre ellos. Por ejemplo en el caso de la determinación del condicional para un año seco o no, se consideraron como valores iniciales los que fueran menores al promedio de la serie, posterior a eso se experimentó con varios valores dentro de ese rango hasta llegar finalmente a los 680 mm anuales.

En la Figura 5-3 se puede ver cómo funcionan los condicionales al realizar el análisis de los datos para llegar a un valor final. Para obtener un valor  $Y_i$  correspondiente a la precipitación que se usa en la ecuación de balance hídrico el modelo comienza a utilizar el valor  $X_i$  correspondiente al dato de precipitación de la estación virtual Olivares que está en base a la estación maitenes.

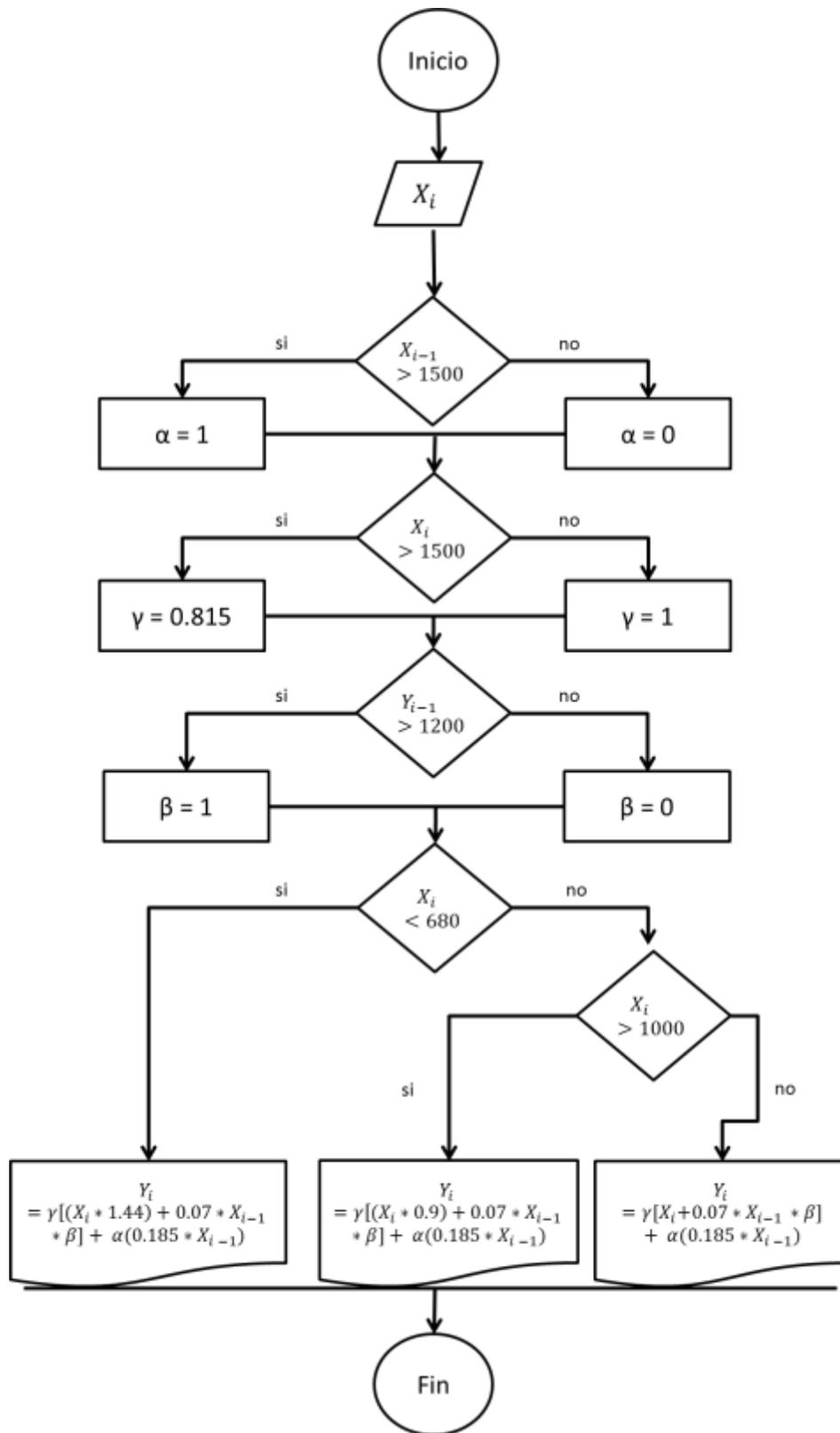


Figura 5-3 Diagrama de flujo condicional para la elección de los valores de precipitación para contribución de caudal en la Cuenca Olivares para un periodo anual

#### 5.4.6 Precipitación periodo de deshielo

Tal como en el capítulo anterior, se ocupó un método de estudio de variables que permitiera generar una serie de condicionales para recrear el comportamiento de la cuenca bajo una serie de parámetros cambiantes. Para el caso del periodo de deshielo se tomó la estación promedio (la serie de precipitaciones promedio entre la estación Maitenes y la estación El Yeso) como el mejor predictor de la cuenca Olivares en el periodo de deshielo y se llevó a cabo una calibración de los datos de la estación virtual Olivares.

Se crea una nueva serie de datos que al igual que en el caso anterior no son los nuevos datos de precipitación, si no que corresponden a una precipitación representativa de referencia y adaptada, que será la utilizada en la ecuación para obtener el caudal correspondiente.

Las determinaciones a tomar en el caso del periodo de deshielo fueron diferentes a las determinaciones del caso anual, esto fundamentalmente porque son periodos distintos y porque la precipitación que se debe estudiar es en realidad el deshielo producto de la precipitación de la estación lluviosa. En lo concreto la nueva adaptación que se hizo es la siguiente:

- En el caso de un año extremo lluvioso, o en este caso con mucha caída de nieve, un cierto porcentaje pasará a ser “contribuyente del caudal” del próximo año. Esto también sirve para justificar casos en que se produzcan lluvias inusuales en el periodo de deshielo.
- En el otro extremo, se consideran años extremadamente secos, años secos y años con tendencia a ser secos. Para estos casos se consideró que dada la heterogeneidad de la cuenca existe una subestimación de la precipitación generada. Los pisos son de 700mm, 500 mm y 350 mm.
- Al igual que en el caso anterior se considera que para años mayores a 1000 mm, existe una sobreestimación, por lo que se pondera por 0.9 para ajustar los valores.
- Se considera también el intervalo entre los 1300 y los 1450 mm de lluvias del año anterior como un año lluvioso, por lo que se deja un porcentaje para “contribuir al siguiente año”, aunque menor al caso extremo lluvioso.

Tal como en el capítulo anterior, la mayor problemática de la estructura es cuando los valores se acercan al límite, pues ahí se generan cambios importantes en los resultados determinados solo por mínimos cambios en el parámetro de precipitación. La determinación de estos límites se llevó a cabo mediante la prueba de varios datos e iteraciones hasta llegar al mejor ajuste. El periodo de deshielo presenta una dificultad mayor de calibrar que el periodo anual, porque se asumen que los parámetros son tan generales como en el periodo anual, sin embargo, en 6 meses esa supuesta generalidad puede no ser tal. En la Figura 5-4 se puede ver cómo funciona el algoritmo de decisiones al realizar el análisis de los datos para llegar a un valor final. Para obtener un valor  $Y_i$  correspondiente a la precipitación que se usara en la ecuación de balance hídrico el modelo comienza a utilizar un valor  $X_i$  correspondiente al dato de precipitación de la estación virtual Olivares y genera un valor que será utilizado en la ecuación de balance.

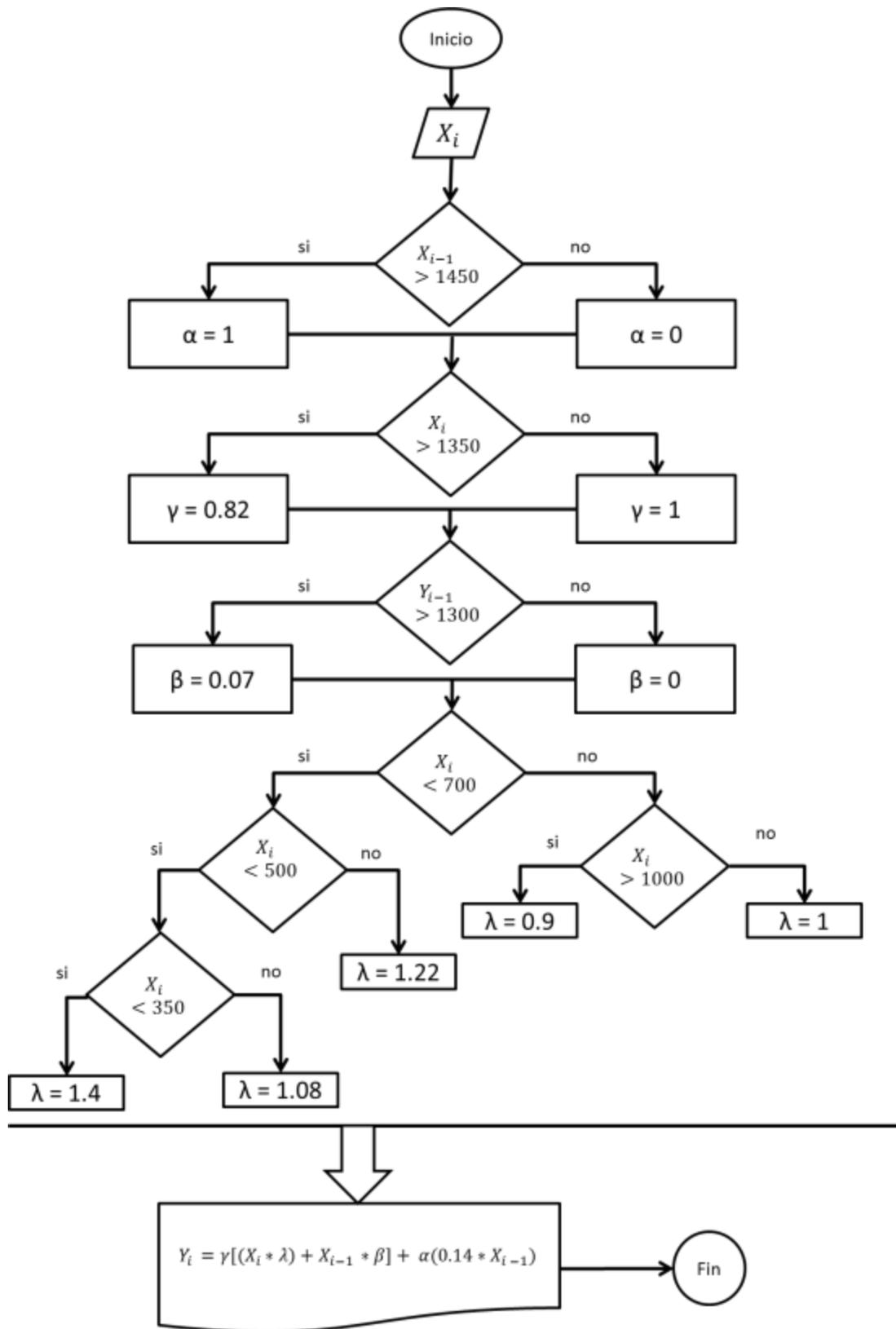


Figura 5-4 Diagrama de flujo condicional para la elección de los valores de precipitación para contribución de caudal en la Cuenca Olivares en el periodo de deshielo.

## 5.5 Resultados de la calibración y Validación

### 5.5.1 Periodo Anual

La calibración y la validación tenían la dificultad de que debían ser probadas en años secos y además en años extremadamente lluviosos. Con la elección de una precipitación de referencia para generar una cierta cantidad de caudal, se determinó que los valores de caudal con diferencias menores a 16% cumplían con lo buscado. El valor porcentual de diferencias se justifica dado que en todos los casos las diferencias puntuales corresponden a valores aproximados de 1 m<sup>3</sup>/s o menos.

Los resultados de la calibración se muestran en la Tabla 5-5, en donde se señalan de izquierda a derecha:

- La primera columna corresponde a la diferencia porcentual entre el caudal observado y el simulado, en donde los valores negativos significan que el simulado es más grande que el real y las diferencias positivas que el caudal observado es más grande que el simulado.
- La segunda columna es la cantidad de millones de metros cúbicos que implica la primera columna, independiente de cuál de los caudales resulto ser el mayor.
- La tercera columna es el tipo de año.
- La Cuarta columna es el valor de la segunda columna, pero en m<sup>3</sup>/s

	Qreal/ QMaitenes[%]	Diferencia en millones de [m <sup>3</sup> ]	Tipo de año	Diferencia en m <sup>3</sup> /s
1991-1992	1.23	6.39	normal	0.20
1992-1993	-11.04	32.16	normal	1.02
1993-1994	-6.73	22.89	normal	0.73
1994-1995	-5.88	15.20	normal	0.48
1995-1996	5.03	11.76	seco	0.37
1996-1997	7.60	13.43	seco	0.43
1997-1998	-8.96	29.28	normal	0.93
1998-1999	-15.77	36.67	seco	1.16
1999-2000	3.46	6.76	seco	0.21
2000-2001	2.46	8.45	normal	0.27
2001-2002	-0.01	0.03	normal	0.00
2002-2003	-10.73	38.28	normal	1.21
2003-2004	11.71	30.44	seco	0.97
2004-2005	2.54	5.80	normal	0.18
2005-2006	-0.21	0.85	normal	0.03
2006-2007	-3.65	10.50	normal	0.33
2007-2008	8.81	21.19	seco	0.67
2008-2009	-4.69	13.44	normal	0.43

Tabla 5-5 Calibración de la cuenca Olivares entre años hidrológicos 1991 a 2009

Una vez calibrado el modelo, se pasó a probar con los 5 años siguientes (2009-2014) para validar los supuestos. Una dificultad adicional, es que precisamente estos 5 años (2009-2014) corresponden a años secos.

En la Tabla 5-6 se muestran los resultados bajo la misma lógica que la tabla anterior.

	Qreal/ QMaitenes[%]	Diferencia en millones de [m <sup>3</sup> ]	Tipo de año	Diferencia en m <sup>3</sup> /s
2009-2010	-2.86	6.98	normal	0.22
2010-2011	-15.10	28.94	seco	0.92
2011-2012	14.12	29.00	seco	0.92
2012-2013	-15.98	32.21	seco	1.02
2013-2014	-14.07	29.45	seco	0.93

*Tabla 5-6 Valores del modelo para cuenca Olivares entre los años hidrológicos 2009 a 2014*

Si bien es cierto las diferencias de 1 m<sup>3</sup>/s pueden ser altas, para el río Olivares puede llegar a representar una diferencia del 12% en caudal promedio anual y en el caso del verano esa diferencia pasa a ser cercana al 4%, para este estudio no es un valor exagerado. En el caso visual puntual, 1 metro cubico puede ser bastante, pero al realizar un análisis anual en que los diversos factores interactúan de manera discontinua, el error posible es aceptable.

### 5.5.2 Periodo de deshielo

Además de las propias dificultades expuestas en lo que se refiere al periodo anual, la calibración y validación del periodo de deshielo suma una variabilidad que la hace más compleja. Es por eso que el porcentaje de diferencia en ese caso se dejó en un rango más amplio que en el anterior, quedando en 20%. Si bien es cierto es bastante alto, también se ajusta a valores similares a 1 m<sup>3</sup>/s, y en este caso por ser el periodo de deshielo y tener mayores caudales, es una medida aceptable.

Los resultados de la calibración se muestran en la Tabla 5-7, en donde se muestran las diferencias porcentuales entre el caudal observado y el caudal simulado, la diferencia en millones de metros cúbicos, el tipo de año y la diferencia referida en m<sup>3</sup>/s entre el caudal Real y el Caudal simulado.

	Qreal/ Qpromedio [%]	Diferencia en millones de [m3]	Tipo de año	Diferencia [m3/s]
1991-1992	17.38	79.19	normal	2.51
1992-1993	0.56	1.18	normal	0.04
1993-1994	19.23	47.52	normal	1.51
1994-1995	6.09	11.78	normal	0.37
1995-1996	17.75	30.31	seco	0.96
1996-1997	18.06	23.13	seco	0.73
1997-1998	-17.79	47.86	normal	1.52
1998-1999	-18.27	30.45	seco	0.97
1999-2000	16.33	24.64	seco	0.78
2000-2001	15.04	43.29	normal	1.37
2001-2002	-16.87	37.32	normal	1.18
2002-2003	0.45	1.28	normal	0.04
2003-2004	-11.75	23.56	seco	0.75
2004-2005	1.73	2.91	normal	0.09
2005-2006	13.77	44.66	normal	1.42
2006-2007	-5.67	11.54	normal	0.37
2007-2008	-14.37	25.05	seco	0.79
2008-2009	-20.00	43.67	normal	1.38

Tabla 5-7 Calibración de la cuenca Olivares en el periodo de deshielo entre años hidrológicos 1991 a 2009

Al igual que en el caso del periodo anual se procedió a validar el modelo con el periodo 2009-2015 (al igual que en el caso anterior presenta la dificultad de ser un periodo seco), los resultados se presentan en la Tabla 5-8.

	Qreal/ Qpromedio [%]	Diferencia en millones de [m3]	Tipo de año	Diferencia [m3/s]
2009-2010	-17.12	-17.12	normal	0.95
2010-2011	-13.12	-13.12	seco	0.50
2011-2012	-8.64	-8.64	seco	0.43
2012-2013	-2.18	-2.18	seco	0.10
2013-2014	-3.58	-3.58	seco	0.18

Tabla 5-8 Valores de la validación para cuenca Olivares en el periodo de deshielo entre los años hidrológicos 2009 a 2014

Para el periodo de deshielo, el caudal promedio es 13.3 m<sup>3</sup>/s, eso quiere decir que 1 m<sup>3</sup>/s representa 7.5% del total. Esto quiere decir que obtener diferencias de 1 m<sup>3</sup>/s en este estudio no representa un valor exagerado considerando los supuestos para obtener el caudal: bocatoma de la central de pasada que se encuentra en el sector, extrapolación de datos del retroceso glaciar con

una cantidad acotada de datos en los últimos 25 años, supuestos en términos de volumen de los glaciares y finalmente la precipitación.

## **6. Análisis y resultados**

### **6.1 Resultados principales**

Los resultados principales para el periodo anual se encuentran expresados en la Figura 6-1, en que la línea marcada al final de la serie corresponde a los datos de validación, que según los valores de la Tabla 5-6 están dentro del rango establecido, aunque en el límite de lo permitido producto de los años secos que son particularmente difíciles de modelar. En el caso de la serie completa de datos, el NSE es de 0.919 y al observar la correlación entre los datos reales y los datos simulados se obtiene un  $R^2 = 0.9345$  según la Figura 6-2



Figura 6-1 Resultados de simulación de caudales en la cuenca Olivares en periodo Anual

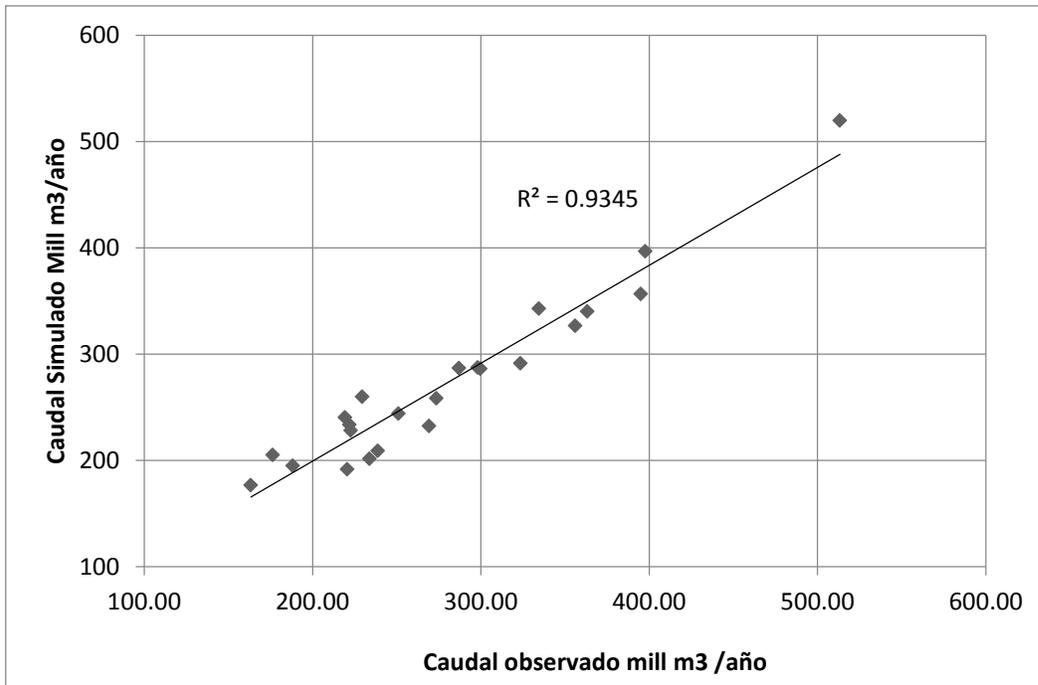


Figura 6-2 Correlación entre los caudales observados y simulados Cuenca Olivares

En el caso del periodo seco los resultados principales se encuentran expresados en la Figura 6-3, en que la línea marcada al final de la serie corresponde a los datos de validación, que según los valores de la Tabla 5-8 están dentro del rango establecido. En el caso de la serie completa de datos el NSE es de 0.81 y al observar la correlación entre los datos reales y los datos simulados se obtiene un  $R^2 = 0.8115$  según la Figura 6-4.

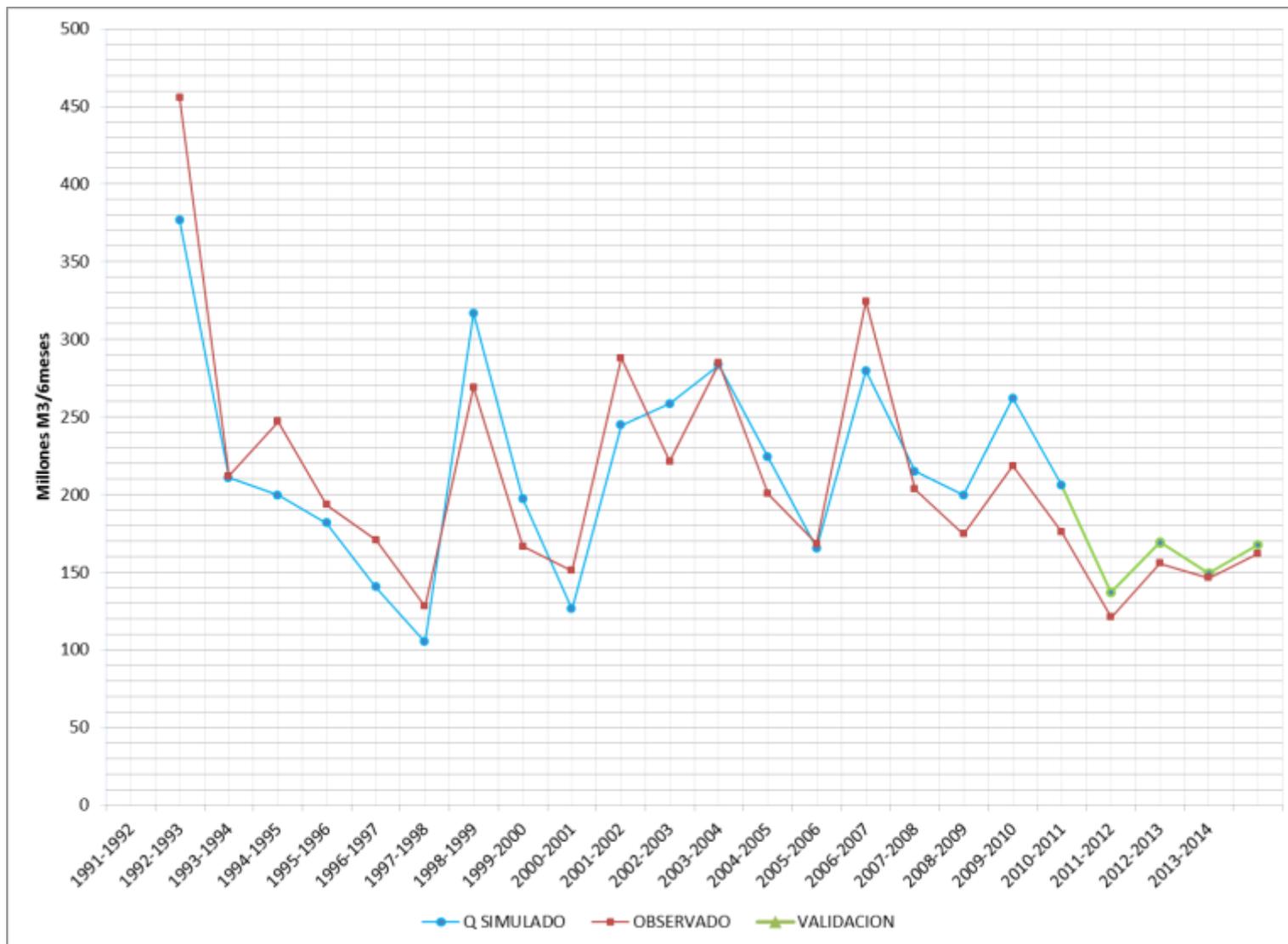


Figura 6-3 Resultados de simulación de caudales en la cuenca Olivares en periodo de deshielo

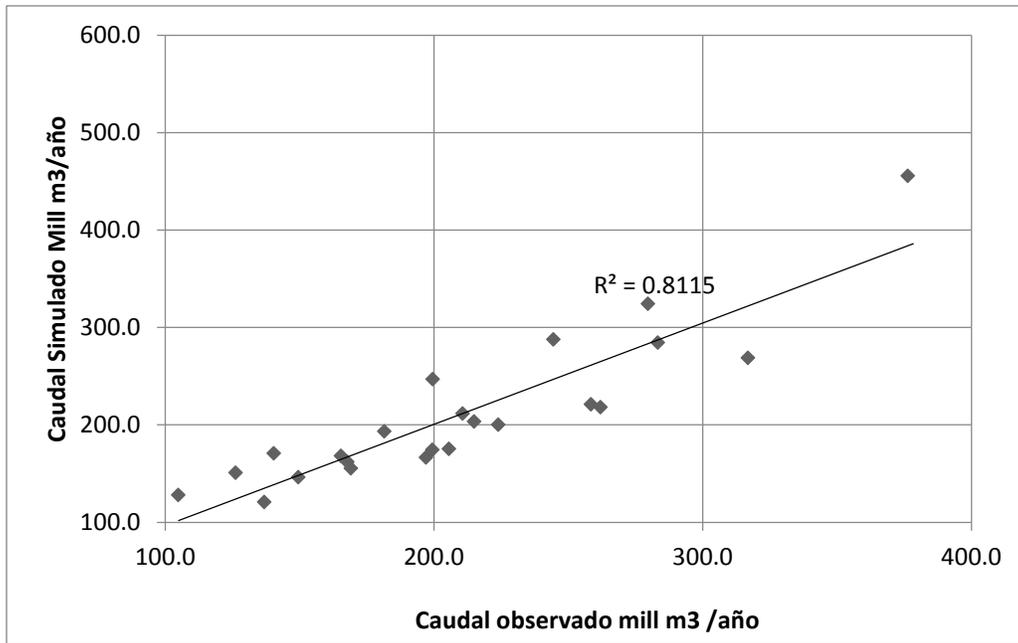


Figura 6-4 Correlación entre los caudales observados y simulados cuenca olivares para el periodo de deshielo.

## 6.2 Escenarios futuros y cambio climático

Con los datos calibrados, es posible establecer cómo se comportará el modelo bajo ciertos parámetros en el futuro. Para esto se tomaron en consideración los cambios propuestos en el “Capítulo 4.6: Cambio climático y escenarios del retroceso glaciar”, tanto para el periodo anual como para el periodo de deshielo.

Se utilizaron datos de un modelo que proyectó cambios de precipitación y temperatura para el periodo comprendido entre el 2040 y el 2070 en cuencas cercanas producto del cambio climático. (Serrano, 2014)

### 6.2.1 Periodo anual

El modelo utilizado (Serrano, 2014) contiene varios casos posibles de precipitación y temperatura para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5. Para este estudio se eligieron 3 casos al azar que de acá en adelante se llaman r1, r2 y r3.

El caudal generado por estos 3 casos para el escenario RCP2.6 se presenta en la Figura 6-5 y para el escenario RCP 8.5 en la Figura 6-6. En términos concretos, para los últimos 25 años de análisis el promedio anual para la cuenca fue de  $8.7 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que anualmente representa un poco más de 274 millones de metros cúbicos anuales y en los últimos años según la Tabla 4-5 caudal medio anual (de cada año) está entre los  $6 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , lo que representa un caudal entre 180 y 208 millones de metros cúbicos al año. La Figura 6-5 y la Figura 6-6 indica que según el modelo del

balance hidrológico en la cuenca y el modelo de precipitación utilizado, hacia el año 2040 el caudal aun estará en torno al promedio histórico de la cuenca, pero hacia el año 2070 el caudal disminuirá hasta llegar a niveles similares al promedio de una temporada de sequía o incluso menor. Sin embargo, esto no significa que no existan efectos desde el 2015 hasta el 2040, ya que existe un mayor derretimiento de los glaciares que complementa el caudal total. Este fenómeno será analizado más adelante con otra figura.

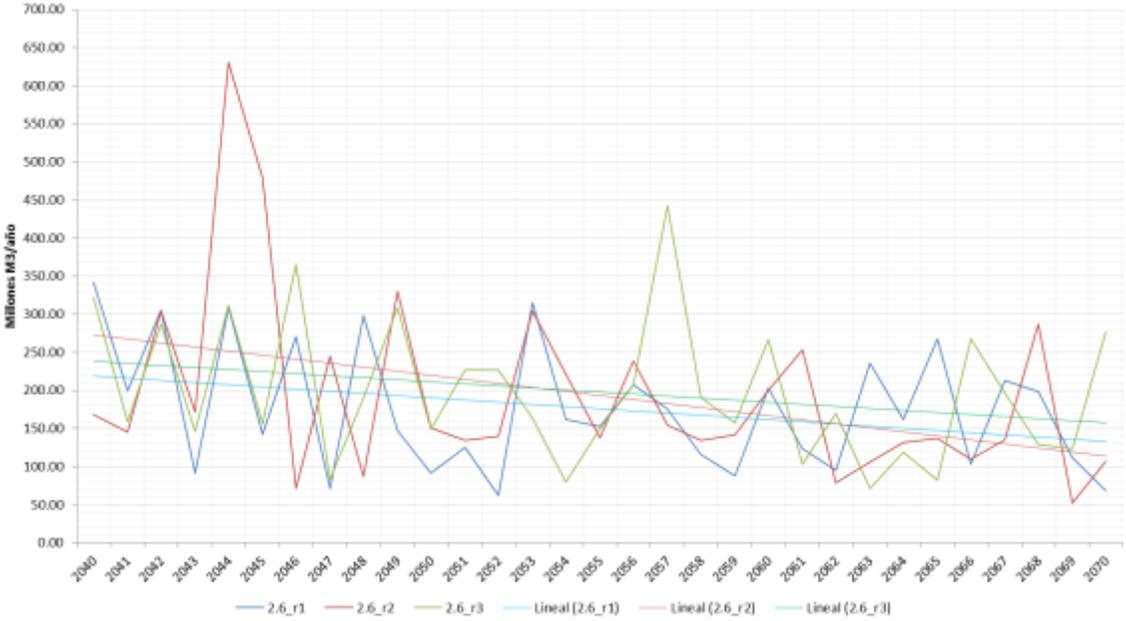


Figura 6-5 Caudales de los casos r1 a r3 para escenario RCP2.6 entre el 2040 y el 2070

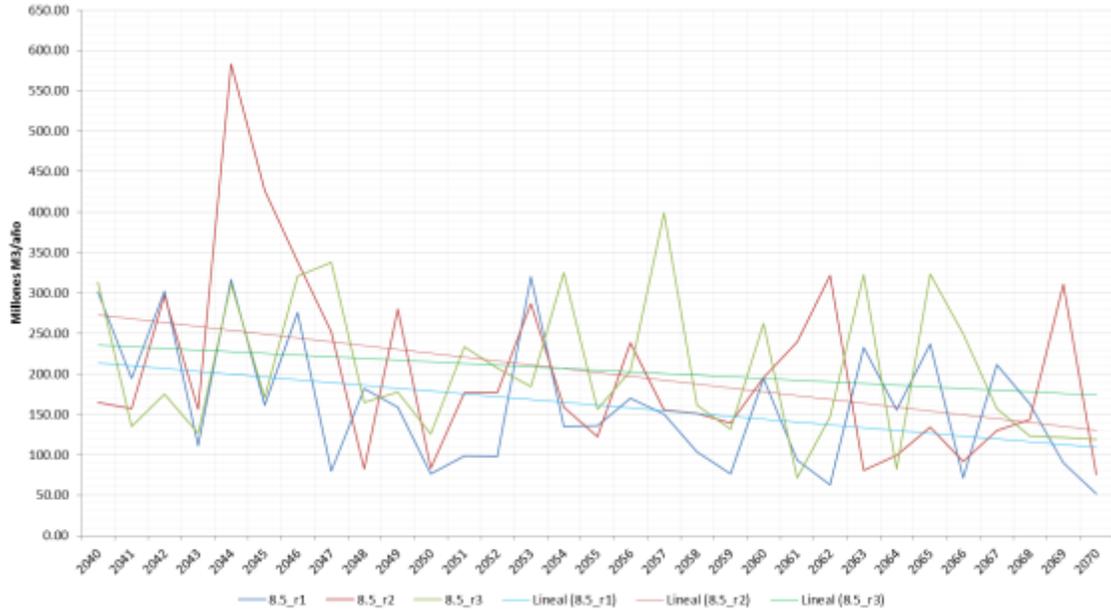


Figura 6-6 Caudales de los casos r1 a r3 para escenario RCP8.5 entre el 2040 y el 2070

Para ver con mayor claridad las diferencias entre ambos escenarios para un caso cualquiera, se tomó el caso r1 que se muestra en la Figura 6-7. En la figura se puede apreciar que en un principio ambos escenarios son relativamente similares, sin embargo hacia el 2070 los escenarios se distancian, siendo el escenario RCP 8.5 el que lleva menos caudal. Esto tiene que ver con la disminución de la precipitación (Garreaud, 2011) y la menor disponibilidad de aporte glaciar producto de un derretimiento más acelerado en el escenario RCP 8.5 que en el escenario RCP 2.6.

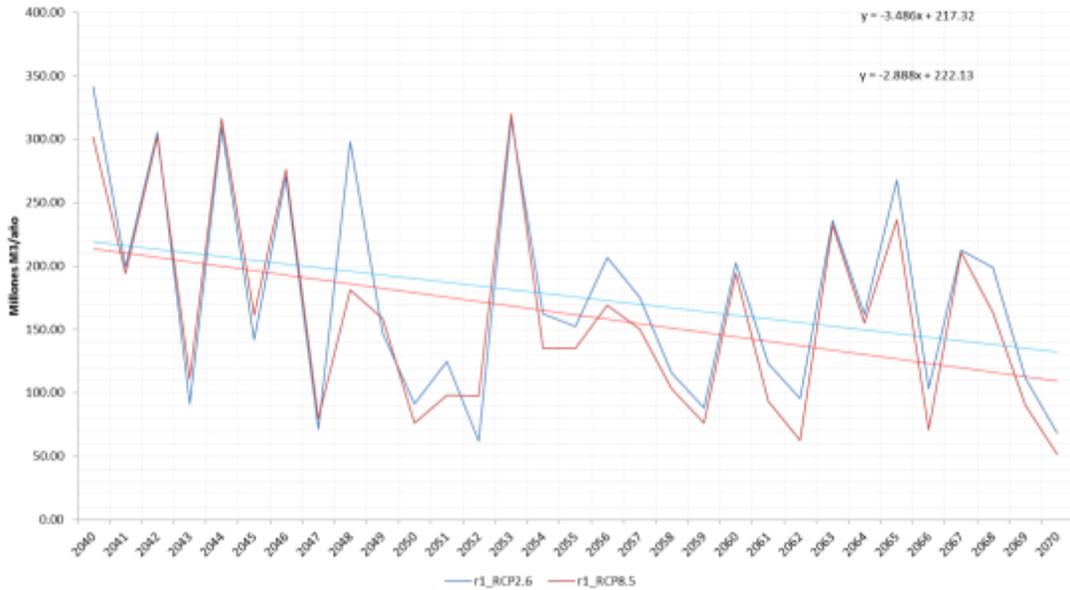


Figura 6-7 Caudales para el caso r1 en los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 entre el 2040 y el 2070

Aunque no existe una constante, la tendencia es clara. En la primera parte del periodo el escenario RCP8.5 lleva más caudal, para posteriormente invertir papeles y el escenario RCP2.6 llevar cerca de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  más que el escenario RCP8.6. Dada la Figura 6-7, la conclusión es que el escenario RCP8.6 está perdiendo más caudal en el tiempo que el escenario RCP2.6 y la razón de esta diferencia se puede ver en la Figura 6-9, que representa la proyección de aporte glaciar para ambos escenarios hasta finales del siglo XXI. Si fijamos la atención en el periodo 2040-2070, se aprecia como el aporte glaciar para el escenario RCP8.5 baja aceleradamente mientras que el aporte glaciar para el escenario RCP2.6 baja de manera más moderada.

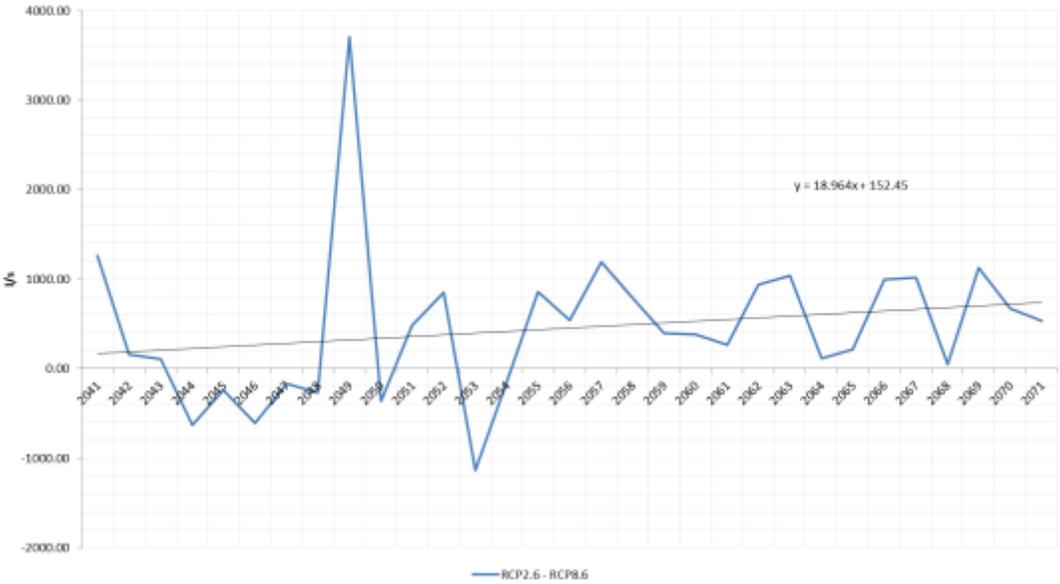


Figura 6-8 Diferencia de caudal en l/s entre escenarios RCP2.6 y RCP 8.5 para el caso r1

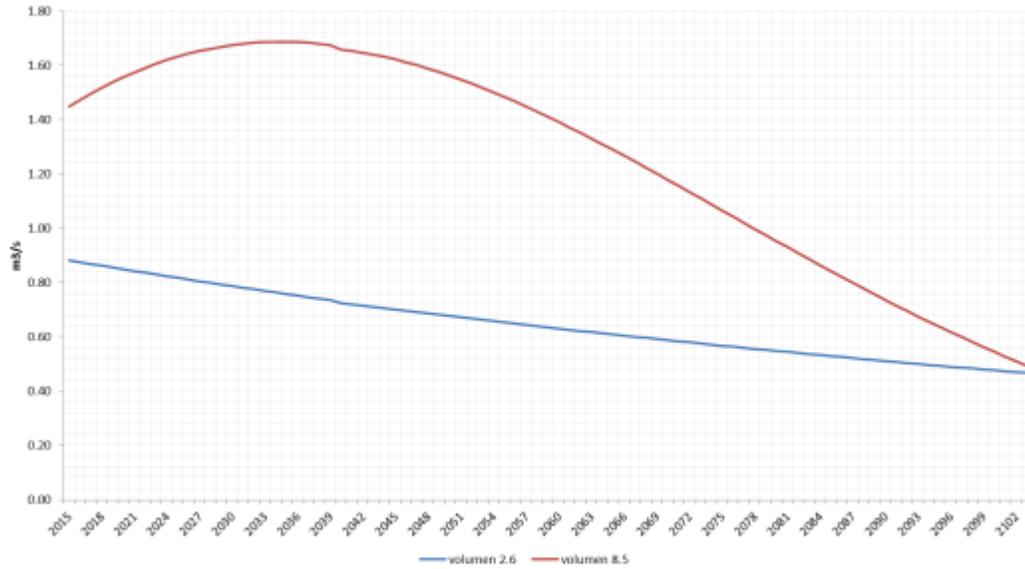


Figura 6-9 Proyección del aporte glaciar para los escenarios RCP2.6 y RCP 8.5 en el periodo anual

Una de las formas prácticas de observar estos resultados es analizar cuanto fue el aporte glaciar durante el periodo de estudio, tanto de calibración como de validación. La Tabla 6-1 nos muestra el porcentaje de aporte glaciar para cada uno de los años, en donde se observa que el mayor aporte anual glaciar es para los años consideramos secos, llegando el promedio a ser 15 % del aporte total, teniendo algunos máximos de hasta 20%, mientras que para los años normales el promedio es de 9.3 %.

	Porcentaje de aporte glaciar a la cuenca	Tipo de año
1991-1992	6.9	normal
1992-1993	8.4	normal
1993-1994	7.4	normal
1994-1995	9.8	normal
1995-1996	12.3	seco
1996-1997	16.7	seco
1997-1998	7.3	normal
1998-1999	10.1	seco
1999-2000	13.4	seco
2000-2001	7.5	normal
2001-2002	8.6	normal
2002-2003	6.2	normal
2003-2004	11.3	seco
2004-2005	11.5	normal
2005-2006	9.2	normal
2006-2007	12.1	normal
2007-2008	17.9	seco
2008-2009	11.7	normal
2009-2010	13.8	normal
2010-2011	15.5	seco
2011-2012	22.0	seco
2012-2013	14.3	seco
2013-2014	16.2	seco

Promedio	11.7
Promedio normal	9.3
Promedio seco	15.0

*Tabla 6-1 Porcentaje de caudal del caudal total producto del retroceso glaciar en la cuenca Olivares*

Al analizar el aporte glaciar para los casos r1, r2, r3 para el escenario RCP2.6 se obtiene lo siguiente:

Para el caso r1, la Figura 6-10 corresponde al caudal con y sin aporte glaciar y la Figura 6-11 corresponde al porcentaje de caudal que es aporte glaciar. Se puede concluir que cuando el caudal es menor el porcentaje de aporte glaciar es mayor, siendo más relevante en los años más secos. En este caso, los años normales tienen un aporte glaciar que está en el rango entre el promedio normal y el promedio seco de la serie histórica de la Tabla 6-1, sin embargo los años más secos tienen un aporte glaciar por sobre el 25% del caudal total, llegando incluso al 30%.

Para el caso r2, la Figura 6-12 corresponde al caudal con y sin aporte glaciar y la Figura 6-13 corresponde al porcentaje de caudal que es aporte glaciar. La conclusión respecto a la relevancia

del aporte en años secos es la misma que para el caso anterior. En este caso, el aporte glaciar también se sitúa en el rango del promedio normal y promedio seco del periodo histórico de la Tabla 6-1. Los años más secos llegan a tener hasta un 35% de aporte glaciar. Los porcentajes de aporte glaciar aumentan con el tiempo y los periodos más secos se vuelven más frecuentes.

Para el caso r3, la Figura 6-14 corresponde al caudal con y sin aporte glaciar y la Figura 6-15 corresponde al porcentaje de caudal que es aporte glaciar. La conclusión es similar que para los casos anteriores. En este caso, el aporte glaciar en años secos esta alrededor del 25% y el promedio también es más elevado que el promedio de un año normal de la serie histórica.

Para todos estos casos se puede concluir que el aporte glaciar en el escenario RCP2.6 en promedio estará entre el 10% y el 15%, sin embargo para los años secos el aporte será entre un 25% y un 30%, además, los periodos secos serán más recurrentes hacia finales del periodo, volviéndose más relevante el aporte glaciar. A esto se debe añadir que el aporte glaciar en el tiempo ira disminuyendo producto de la menor disponibilidad, pero aun así, será cada vez más relevante ya que las precipitaciones disminuirán.

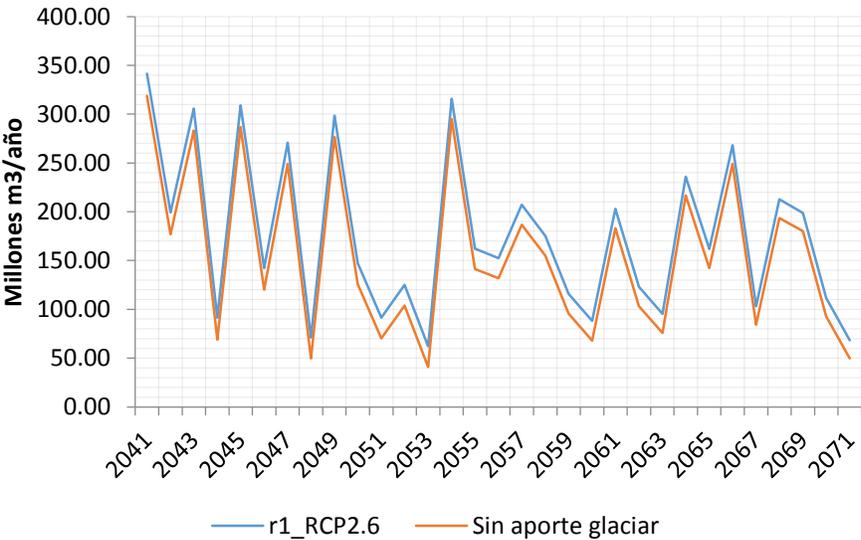


Figura 6-10 Proyección de caudales caso r1 para el escenario RCP2.6 con y sin aporte glaciar

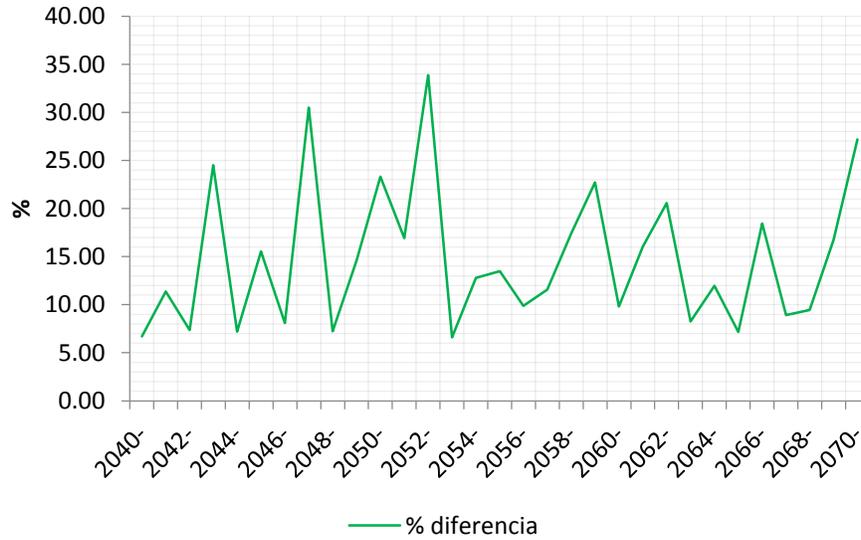


Figura 6-11 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r1 en el escenario RCP2.6

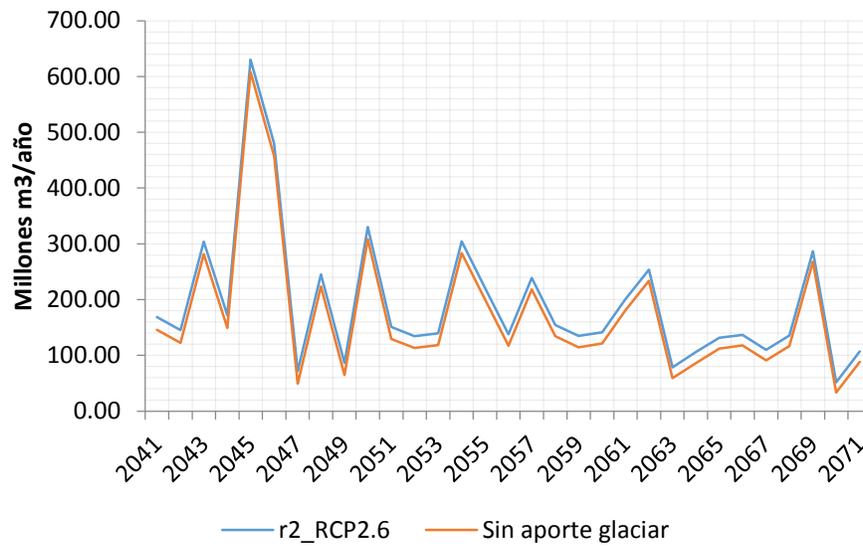


Figura 6-12 Proyección de caudales caso r2 para el escenario RCP2.6 con y sin aporte glaciar

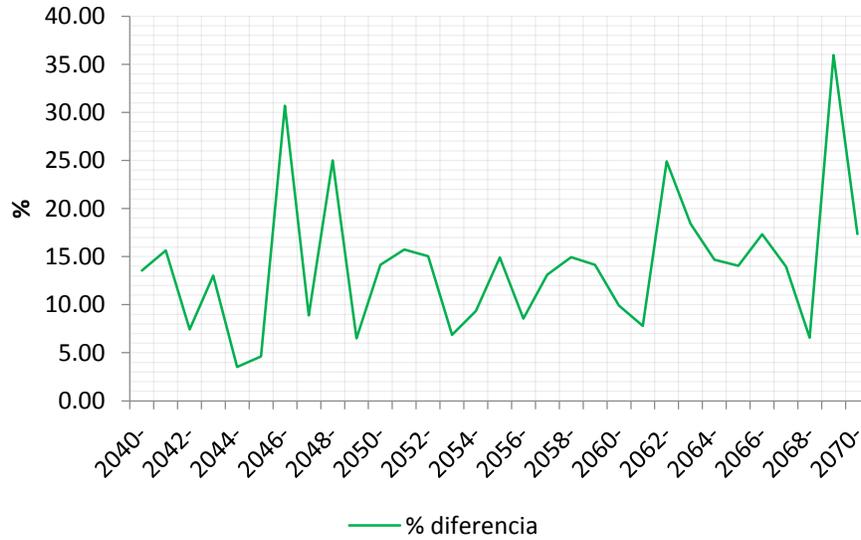


Figura 6-13 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r2 en el escenario RCP2.6

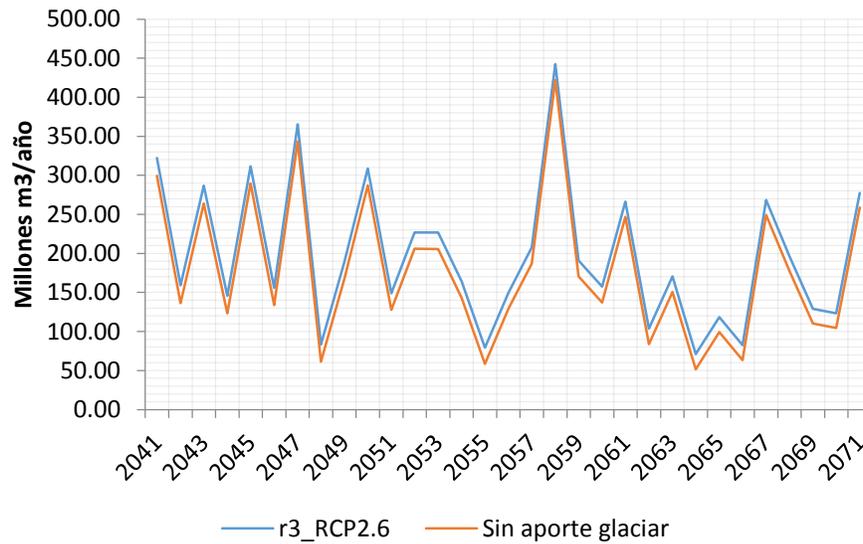


Figura 6-14 Proyección de caudales caso r3 para el escenario RCP2.6 con y sin aporte glaciar

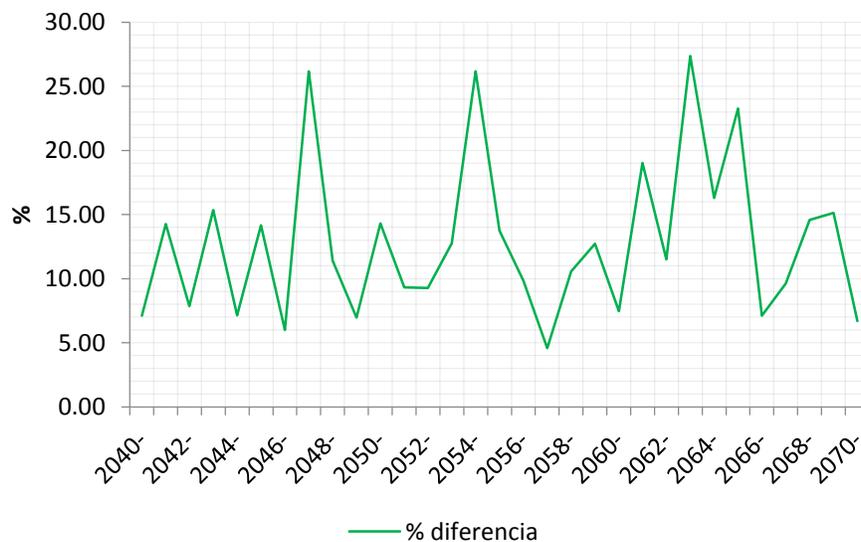


Figura 6-15 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r3 en el escenario RCP2.6

Para el escenario RCP8.5, se realizó el mismo análisis que para el escenario RCP2.6. Las figuras correspondientes a cada caso son las siguientes:

Caso r1: Figura 6-16 que corresponde al caudal con y sin aporte glaciar y la Figura 6-17 que corresponde al porcentaje de caudal que es aporte glaciar

Caso r2: Figura 6-18 que corresponde al caudal con y sin aporte glaciar y la Figura 6-19 que corresponde al porcentaje de caudal que es aporte glaciar

Caso r3: Figura 6-20 que corresponde al caudal con y sin aporte glaciar y la Figura 6-21 que corresponde al porcentaje de caudal que es aporte glaciar.

Las conclusiones en general para estos 3 casos en el escenario RCP8.5 es que el aporte glaciar en los años secos es mayor que en el escenario RCP2.6. Para todos los casos en la Figura 6-16, la Figura 6-18 y la Figura 6-20, la diferencia entre el caudal con y sin aporte glaciar es más notoria. En términos porcentuales, el aporte glaciar se sitúa entre un 30 y un 40%, sin embargo en periodos secos el aporte glaciar puede representar entre un 60% y 70% del caudal total. Esto se debe principalmente a que el aporte glaciar, por un retroceso más acelerado, es mayor en el escenario RCP8.5 que en el escenario RCP2.6 y en que para el escenario RCP8.5 las predicciones de magnitud de precipitación son menores. A consecuencia de esto último la recurrencia de periodos más secos es mayor en el escenario RCP8.5 que en el escenario RCP2.6

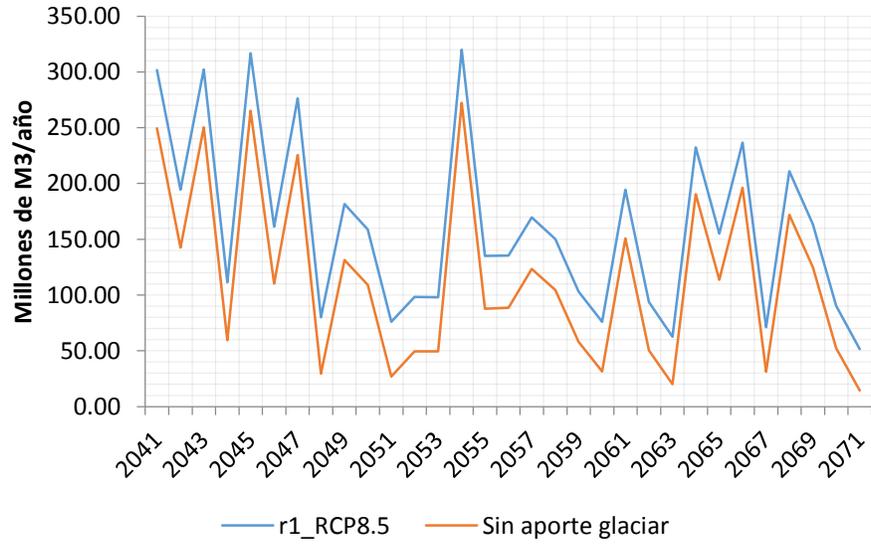


Figura 6-16 Proyección de caudales caso r1 para el escenario RCP8.5 con y sin aporte glaciar

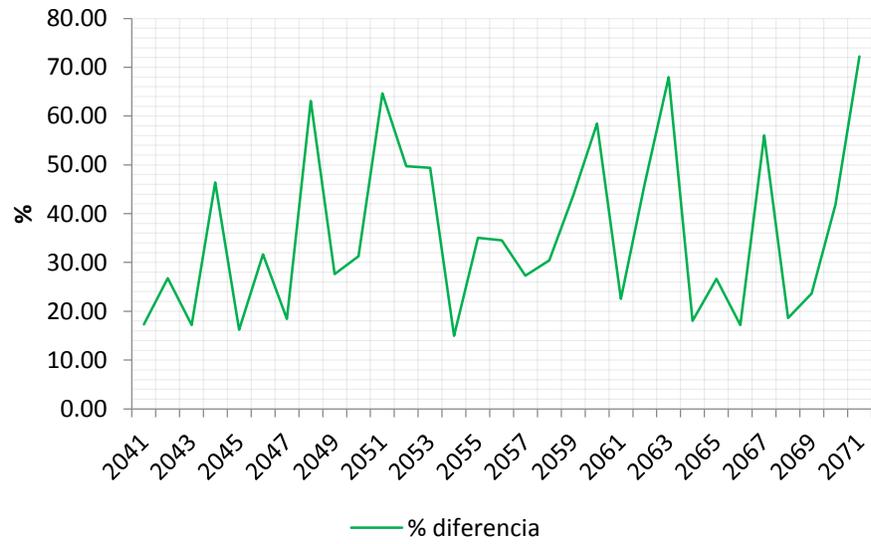


Figura 6-17 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r1 en el escenario RCP8.5

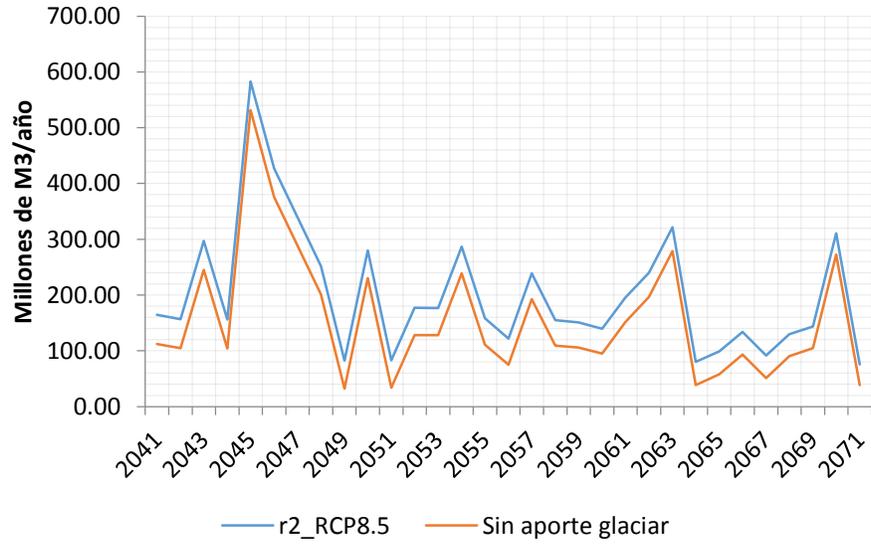


Figura 6-18 Proyección de caudales caso r2 para el escenario RCP8.5 con y sin aporte glaciar

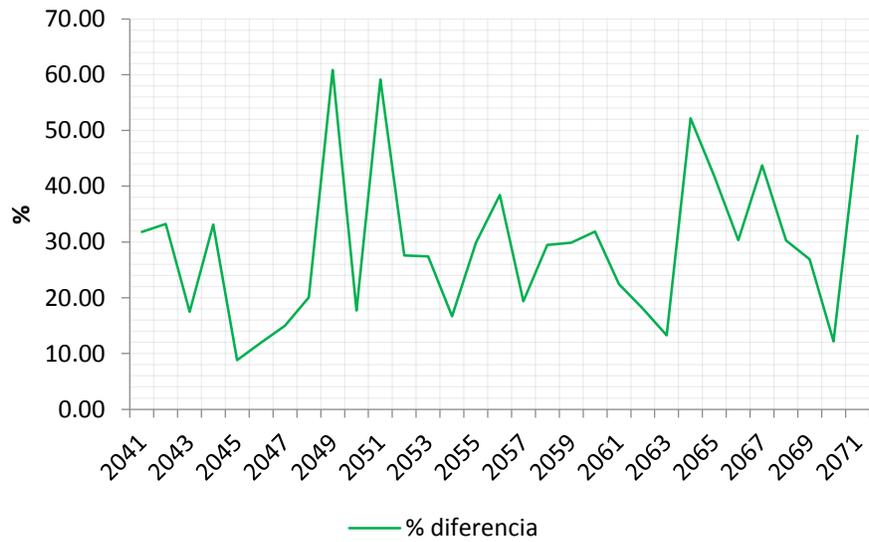


Figura 6-19 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r2 en el escenario RCP8.5

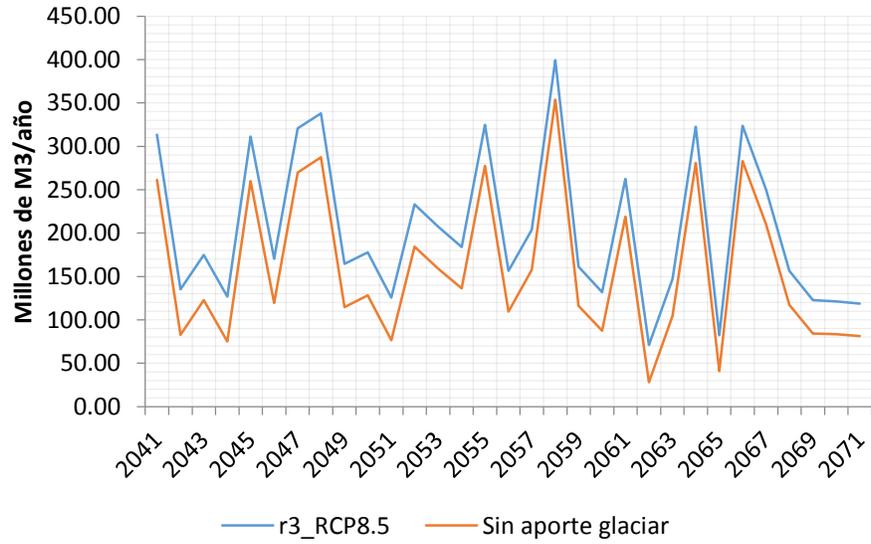


Figura 6-20 Proyección de caudales caso r3 para el escenario RCP8.5 con y sin aporte glaciar

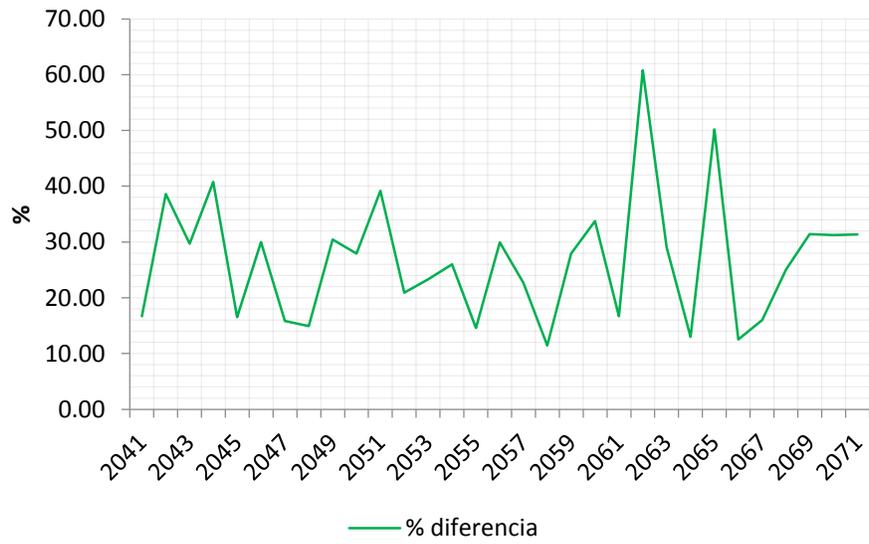


Figura 6-21 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r3 en el escenario RCP8.5

## 6.2.2 Periodo de deshielo

Para el periodo de deshielo se realizó mismo análisis que para el periodo anual, pero utilizando los valores correspondientes al periodo de deshielo. Se analizaron 3 casos para el escenario RCP2.6 y 3 casos para el escenario RCP8.5. Para los últimos 25 años el promedio de caudales para el periodo de deshielo es de 13.4 m<sup>3</sup>/s. Según la Figura 6-22 y la Figura 6-23 que muestran las proyecciones de los caudales entre el periodo 2040 y 2070, el promedio podría incluso disminuir a la mitad, siendo muy parecido al promedio anual de un año seco. Independiente del caso usado, el modelo predice la disminución drástica de los caudales en el periodo de deshielo, esto debido principalmente a la disminución de precipitaciones, el aumento de temperatura y el drástico derretimiento de cobertura glaciar.

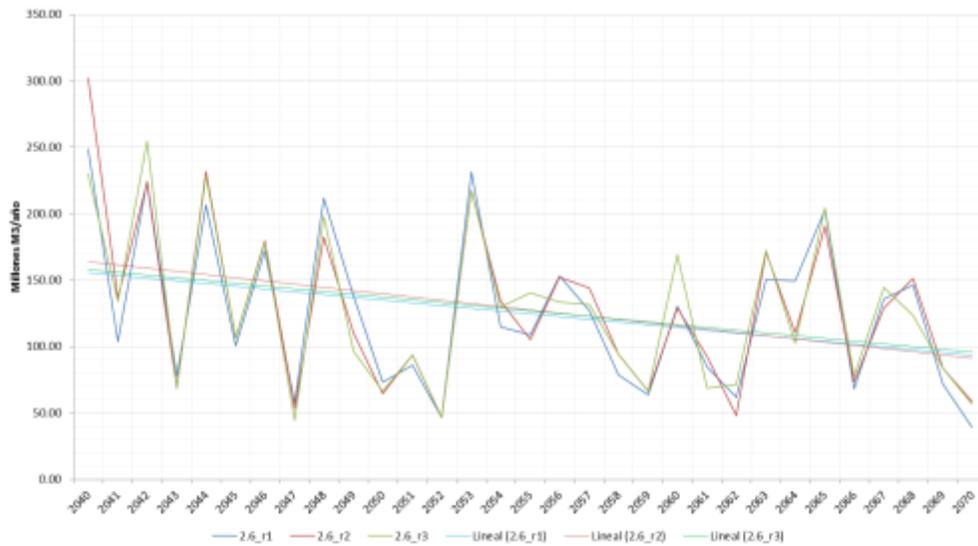


Figura 6-22 Caudales de los casos r1 a r3 para escenario RCP2.6 entre el 2040 y el 2070 para el periodo de deshielo

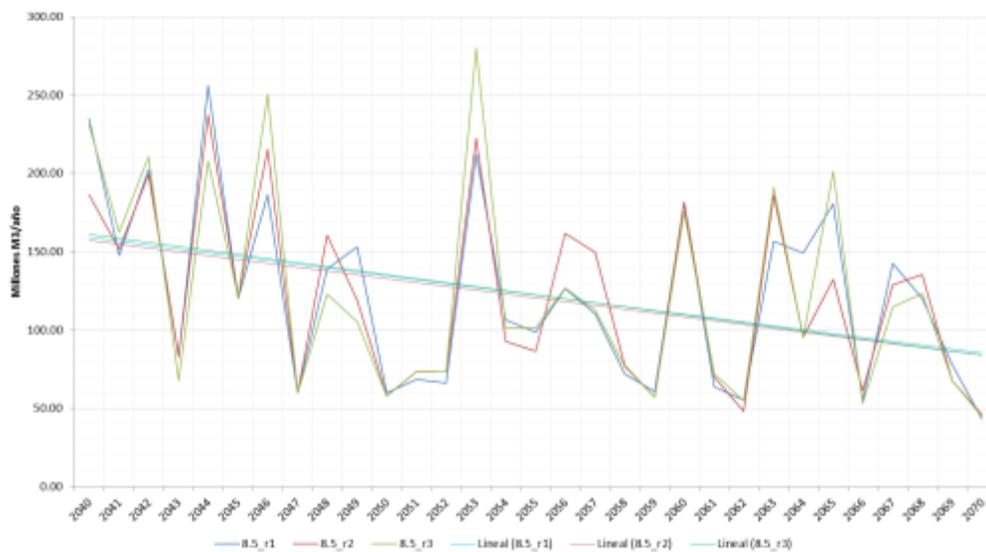


Figura 6-23 Caudales de los casos r1 a r3 para escenario RCP8.5 entre el 2040 y el 2070 para el periodo de deshielo

El análisis para las diferencias entre el escenario RCP2.6 y el escenario RCP8.5 se puede ver en la Figura 6-24, en donde se escogió uno de los casos (r1) y se compararon los caudales de ambos escenarios. Al principio de la serie el escenario RCP8.5 tiende a ser el más caudaloso, sin embargo hacia el final esa tendencia se revierte. Las líneas de tendencia muestran que el descenso de caudal del escenario RCP8.5 es más acelerado que la del escenario RCP2.6

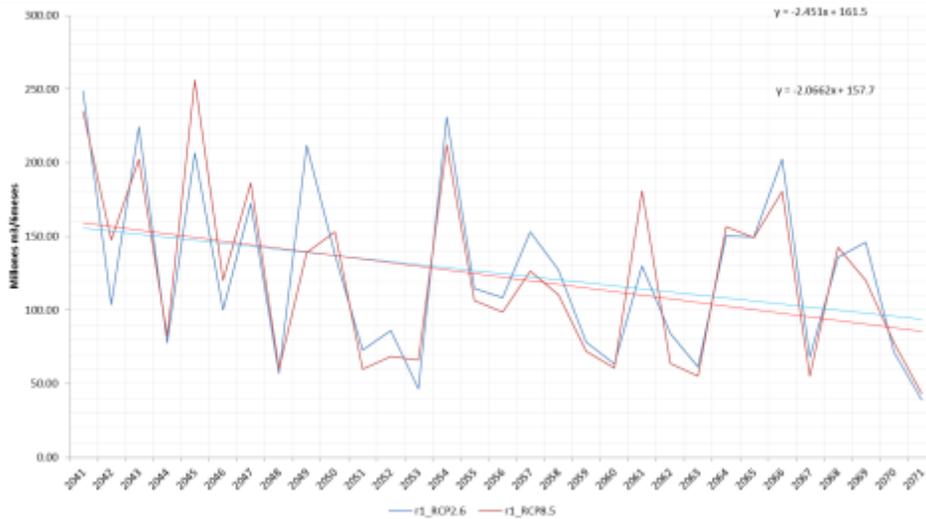


Figura 6-24 Caudales para el caso r1 en los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 entre el 2040 y el 2070

Aunque no es tan claro como en el caso del periodo anual, en el periodo de deshielo también se da la tendencia de la diferencia de caudal entre el escenario RCP2.6 y el escenario RCP8.5. En la Figura 6-25 se puede ver que en la segunda mitad del periodo el escenario RCP2.6 lleva más caudal que el escenario RCP8.5 aunque existen algunos puntos en que sucede lo contrario, a pesar de esto, la tendencia es que el escenario RCP2.6 lleve cerca de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  más que el escenario RCP8.5 a finales del periodo. La explicación de este fenómeno al igual que en el periodo anual, tiene que ver con el derretimiento glaciar más acelerado en el escenario RCP8.5.

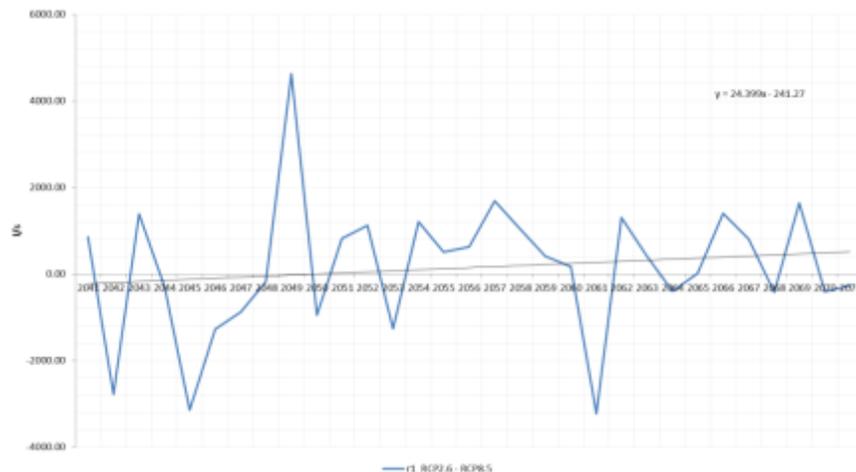


Figura 6-25 Diferencia de caudal en l/s entre escenarios RCP2.6 y RCP 8.5 para el caso r1 en el periodo de deshielo

Dado lo anterior, la Figura 6-26 nos muestra el aporte glaciar en los escenarios RCP2.6 y RCP8.5. La cantidad de caudal aportante por los glaciares en el caso del escenario RCP2.6 en el presente esta en torno a 1.7 m<sup>3</sup>/s y la proyección es que hacia el periodo 2040-2070 sea alrededor de 1.3 m<sup>3</sup>/s. En el caso del escenario RCP8.5 el aporte al principio es cercano a 2.8 m<sup>3</sup>/s, posteriormente pasaría a un máximo de 3.2 m<sup>3</sup>/s aprox. y hacia el periodo 2040-2070 bajaría a 3 m<sup>3</sup>/s. Posterior al año 2100 la tendencia debería revertirse y el aporte glaciar será mayor en el escenario RCP2.6 que en el escenario RCP8.5.

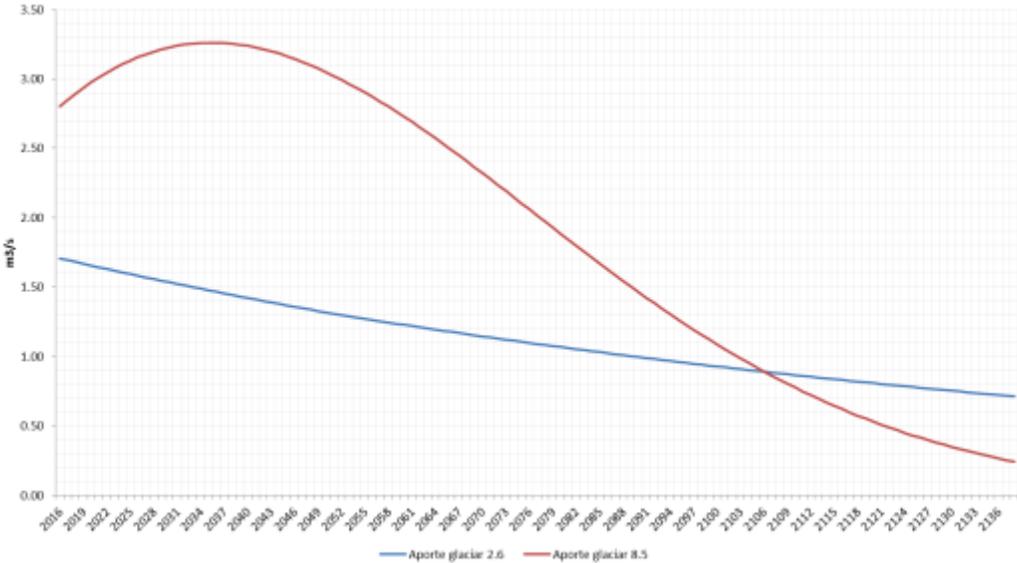


Figura 6-26 Proyección del aporte glaciar para los escenarios RCP2.6 y RCP8.5 en el periodo de deshielo.

Una de las formas prácticas de observar estos resultados es analizar cuanto fue el aporte glaciar durante el periodo de estudio, tanto de calibración como de validación. La Tabla 6-2 muestra el porcentaje de aporte glaciar para cada uno de los años en el periodo de deshielo, en donde se observa que el mayor aporte anual glaciar es para los años considerados secos, llegando el promedio a ser 19.9% del aporte total, teniendo algunos máximos de hasta 25%, mientras que para los años normales en el periodo de deshielo el promedio es de 12.3 %. Si se piensa en caudales cercanos a 3 m<sup>3</sup>/s y en el promedio del caudal del periodo de deshielo que es cercano a 13 m<sup>3</sup>/s, el aporte glaciar representa cerca del 20 % del aporte total, lo que concuerda con los valores de la tabla.

	Porcentaje de aporte glaciar a la cuenca	Tipo de año
1991-1992	9.2	normal
1992-1993	12.6	normal
1993-1994	13.2	normal
1994-1995	14.3	normal
1995-1996	18.8	seco
1996-1997	25.1	seco
1997-1998	8.0	normal
1998-1999	13.3	seco
1999-2000	19.7	seco
2000-2001	10.1	normal
2001-2002	9.5	normal
2002-2003	8.6	normal
2003-2004	11.5	seco
2004-2005	15.3	normal
2005-2006	12.9	normal
2006-2007	16.5	normal
2007-2008	19.1	seco
2008-2009	13.4	normal
2009-2010	16.8	normal
2010-2011	24.9	seco
2011-2012	22.2	seco
2012-2013	22.3	seco
2013-2014	22.2	seco

Promedio	15.6
Promedio normal	12.3
Promedio seco	19.9

*Tabla 6-2 Porcentaje de caudal del caudal total producto del retroceso glaciar en la cuenca Olivares para el periodo de deshielo, serie histórica*

Para analizar el aporte glaciar en el periodo 2040-2070 con condiciones de cambio climático, se analizaron 3 casos (r1, r2, r3) para los escenarios RCP2.6 y el escenario RCP8.5.

Para el escenario RCP2.6 las figuras para cada caso son las siguientes:

Caso r1: Figura 6-27 que corresponde al caudal con y sin aporte glaciar y la Figura 6-28 que corresponde al porcentaje de caudal que es aporte glaciar

Caso r2: Figura 6-29 que corresponde al caudal con y sin aporte glaciar y la Figura 6-30 que corresponde al porcentaje de caudal que es aporte glaciar

Caso r3: Figura 6-31 que corresponde al caudal con y sin aporte glaciar y la Figura 6-32 que corresponde al porcentaje de caudal que es aporte glaciar.

La conclusión general respecto a cuan relevante es el aporte glaciar, es la misma que para el periodo anual. Cuando existen años secos, el aporte glaciar es cada vez más importante, el análisis caso a caso es lo que sigue:

Para el caso r1, los años normales al principio de la serie tiene un aporte glaciar cercano al 20% del total del caudal, sin embargo hacia el final de la serie este porcentaje se empina por sobre el 30%. Cuando existen años secos el aporte glaciar llega a ser casi el 50% del total del caudal.

Para el caso r2, es bastante similar al caso r1, cerca del 20% del caudal en un principio y más del 30% al final de la serie, con peak de casi 50% en los años más secos. La diferencia con el caso r1, es que en esta serie se aprecia una recurrencia mayor de los años secos.

Para el caso r3, al igual que los dos casos anteriores al principio cerca del 20% del caudal es producto del aporte glaciar, la diferencia con los otros casos es que este valor se mantiene más estable en el tiempo, aunque igualmente existen peak producto de los años más secos, llegando a ser el aporte glaciar cerca del 50% del caudal total para estos años.

Para todos estos casos se puede concluir que el aporte glaciar en el escenario RCP2.6 en promedio estará cercano al 20%, pero en años más secos puede llegar incluso a ser el 50% del caudal total.

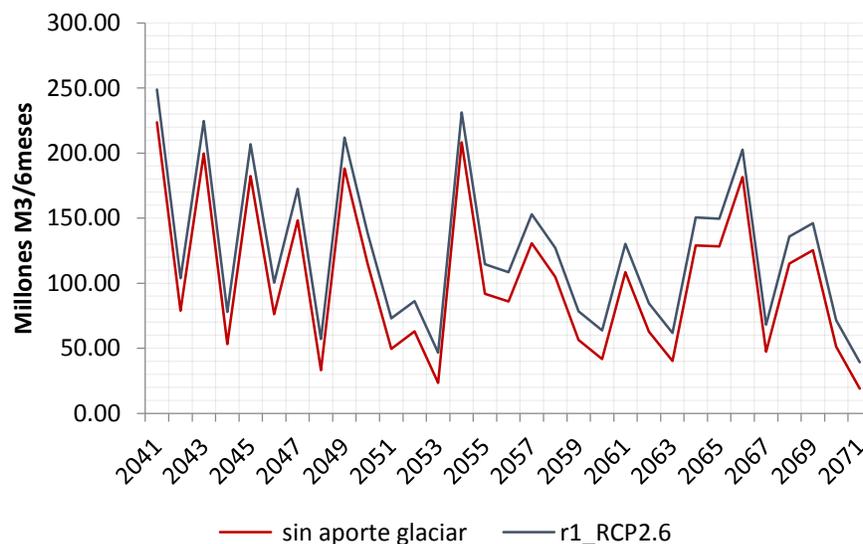


Figura 6-27 Proyección de caudales caso r1 para el escenario RCP2.6 con y sin aporte glaciar en el periodo de deshielo

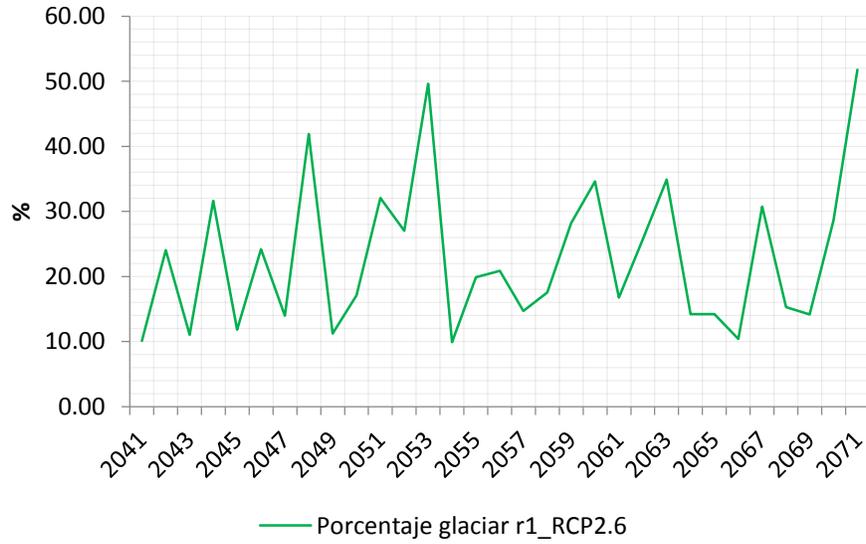


Figura 6-28 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r1 en el escenario RCP2.6 en el periodo de deshielo

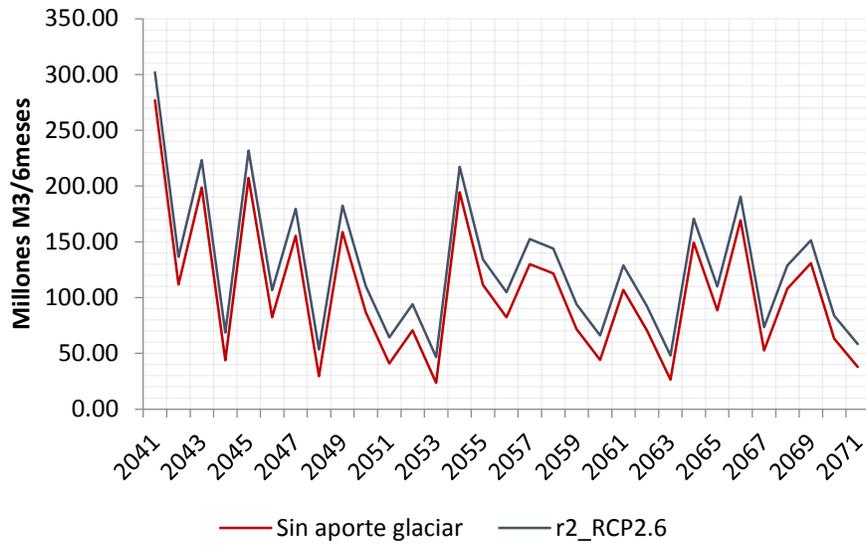


Figura 6-29 Proyección de caudales caso r2 para el escenario RCP2.6 con y sin aporte glaciar en el periodo de deshielo

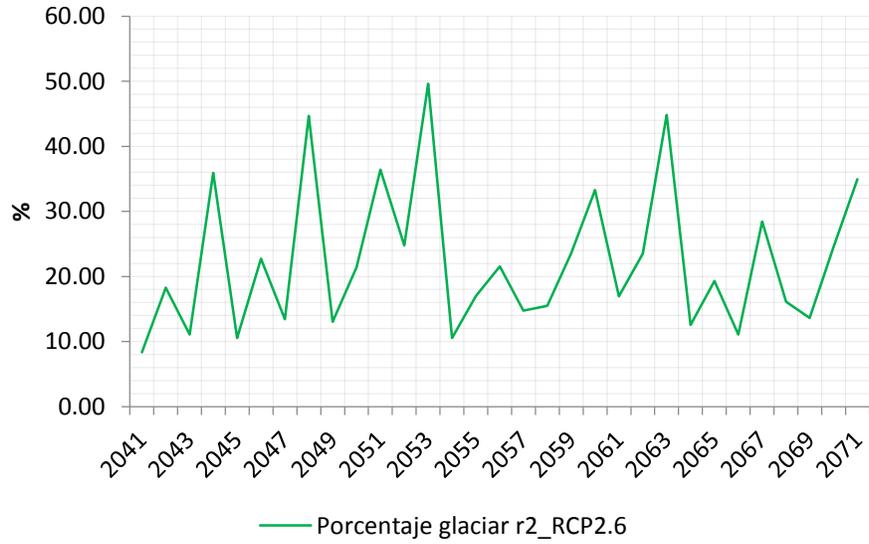


Figura 6-30 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r2 en el escenario RCP2.6 en el periodo de deshielo

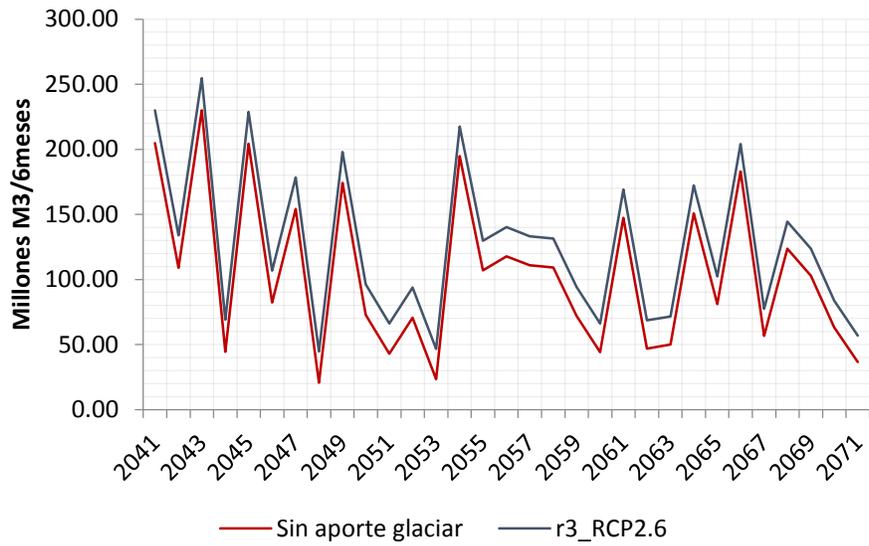


Figura 6-31 Proyección de caudales caso r3 para el escenario RCP2.6 con y sin aporte glaciar en el periodo de deshielo

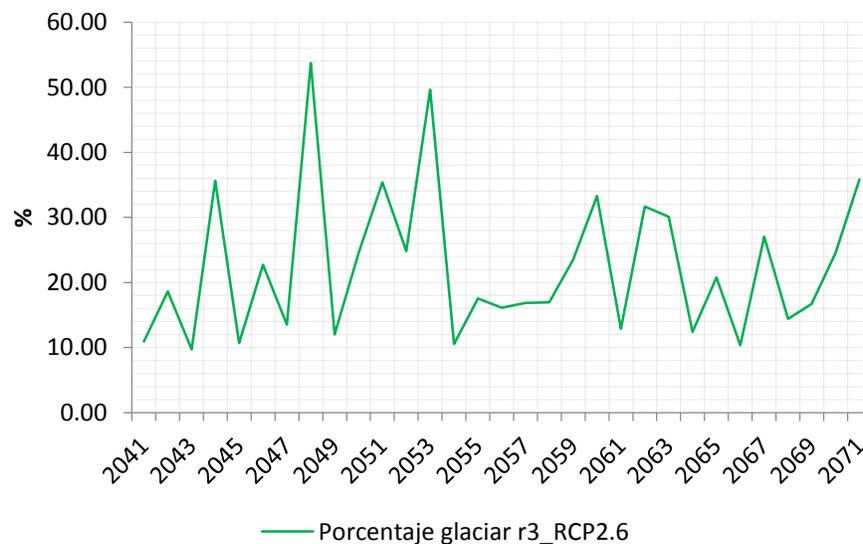


Figura 6-32 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r3 en el escenario RCP2.6 en el periodo de deshielo

Para el escenario RCP8.5, se realizó el mismo análisis que para el escenario RCP2.6. Las figuras correspondientes a cada caso son las siguientes:

Caso r1: Figura 6-33 que corresponde al caudal con y sin aporte glaciar y la Figura 6-34 que corresponde al porcentaje de caudal que es aporte glaciar

Caso r2: Figura 6-35 que corresponde al caudal con y sin aporte glaciar y la Figura 6-36 que corresponde al porcentaje de caudal que es aporte glaciar

Caso r3: Figura 6-37 que corresponde al caudal con y sin aporte glaciar y la Figura 6-38 que corresponde al porcentaje de caudal que es aporte glaciar.

Las conclusiones en general para estos 3 casos en el escenario RCP8.5 es que el aporte glaciar en los años secos es mayor que en el escenario RCP2.6. Para el escenario RCP8.5 la recurrencia de años secos es mucho mayor que para el otro escenario, por lo que la relevancia del aporte glaciar es más importante. Dada las características del escenario RCP8.5 la disponibilidad de precipitación es menor en gran parte de la serie y el derretimiento glaciar es mayor, por lo tanto, el aporte glaciar al total del caudal en periodos normales es cercano al 30% (un poco mayor que el promedio actual), sin embargo en los años secos, el aporte glaciar puede estar por sobre el 80% e incluso elevarse hasta el 90% del total del caudal. Esto quiere decir, que si la cobertura nival en un periodo es muy baja, el derretimiento glaciar representa casi todo el caudal que transita por el río.

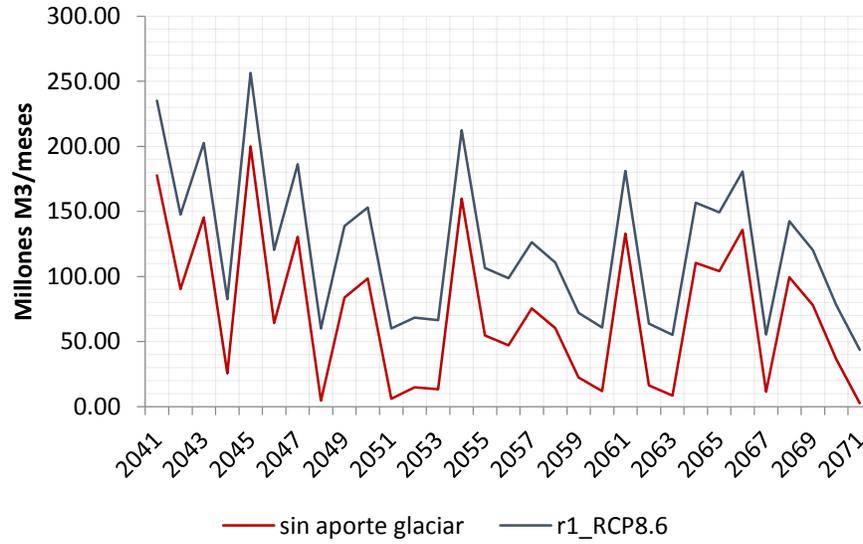


Figura 6-33 Proyección de caudales caso r1 para el escenario RCP8.5 con y sin aporte glaciar en el periodo de deshielo

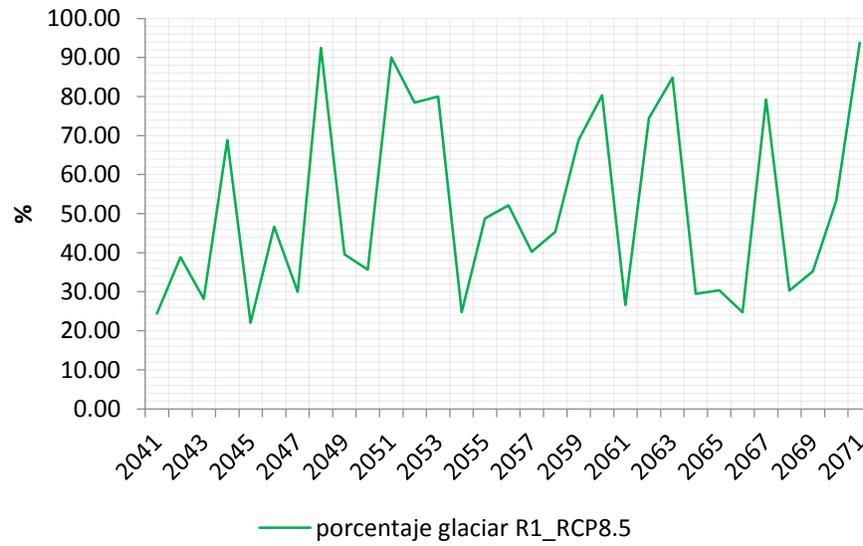


Figura 6-34 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r1 en el escenario RCP8.5 en el periodo de deshielo

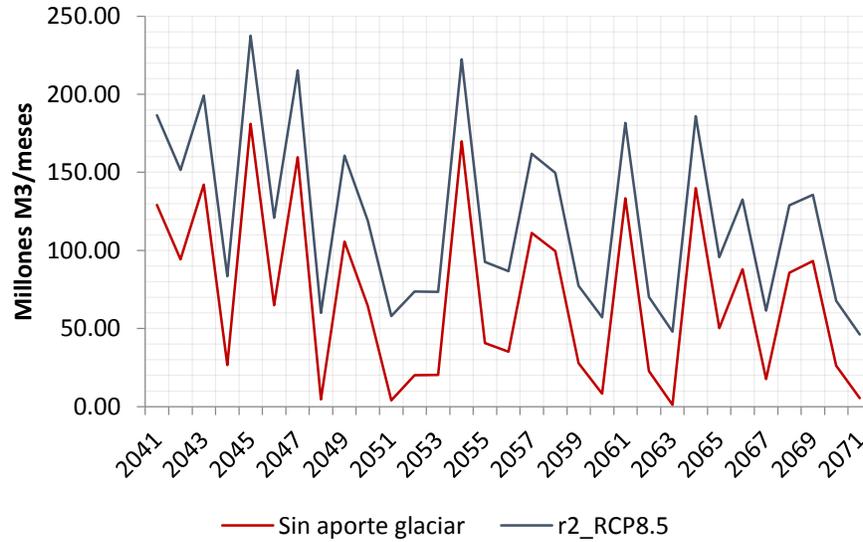


Figura 6-35 Proyección de caudales caso r2 para el escenario RCP8.5 con y sin aporte glaciar en el periodo de deshielo

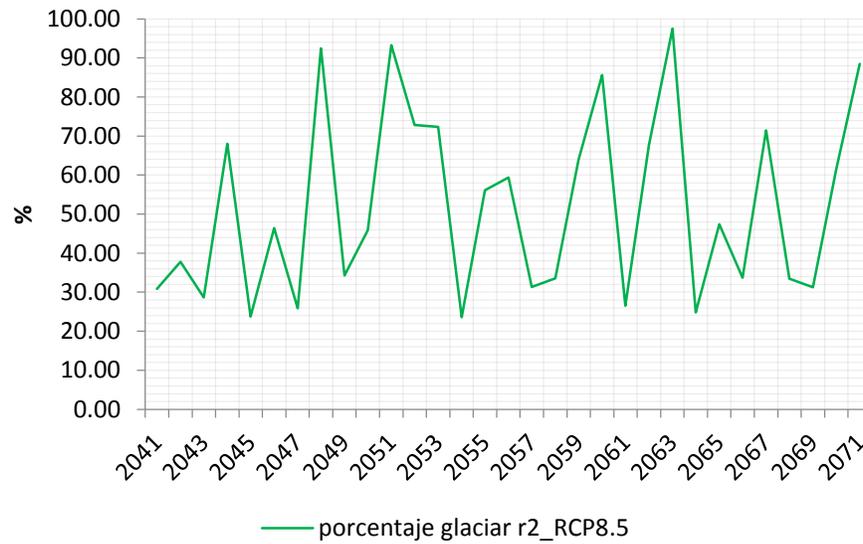


Figura 6-36 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r2 en el escenario RCP8.5 en el periodo de deshielo

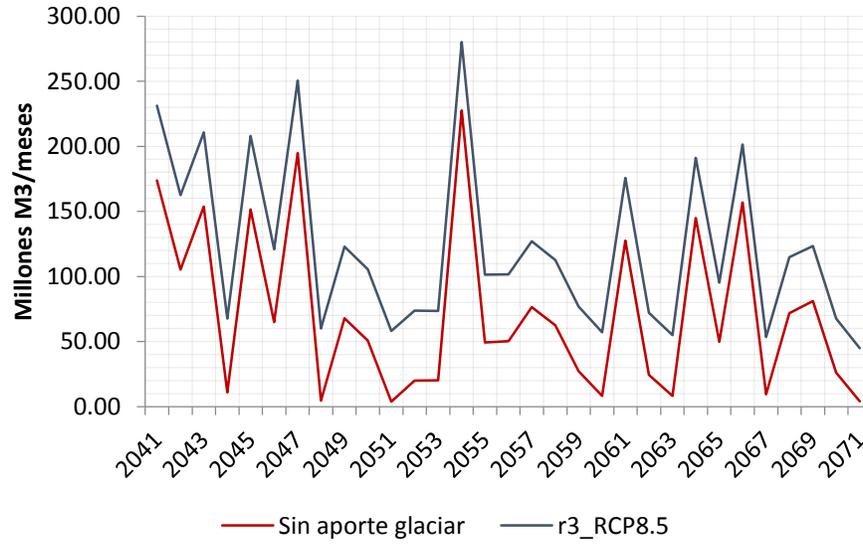


Figura 6-37 Proyección de caudales caso r3 para el escenario RCP8.5 con y sin aporte glaciar en el periodo de deshielo

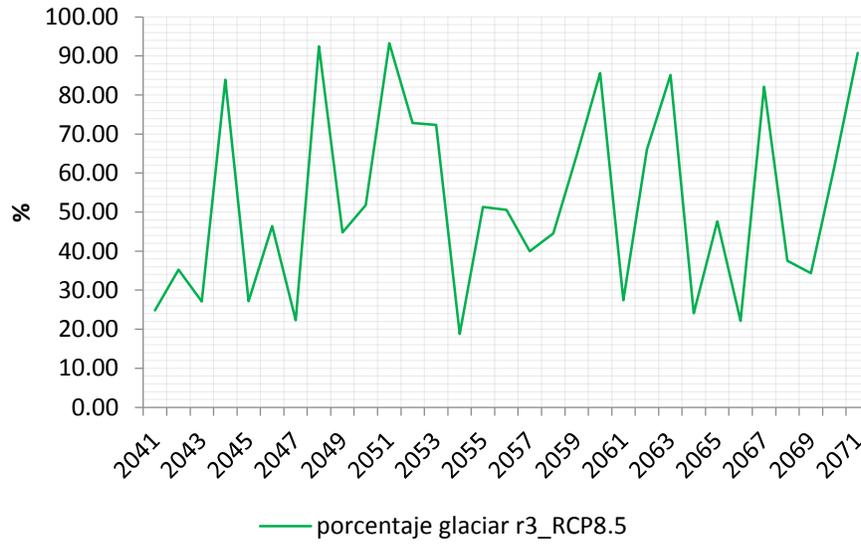


Figura 6-38 Proyección del porcentaje de aporte de caudal de los glaciares al caudal total de la cuenca para el caso r3 en el escenario RCP8.5 en el periodo de deshielo

## 7. Conclusiones

Después de realizar un exhaustivo análisis de la cuenca del río Olivares, se logró establecer un método mediante el cual fue posible establecer la relación entre los parámetros determinados en el estudio con el caudal que debiese existir a la salida de la cuenca, si es que esta tuviese un régimen natural. Esto dio como resultado la determinación de la influencia de los glaciares de la cuenca en la variabilidad hidrológica del río Olivares.

La productividad de los glaciares en la zona dependerá de la situación hidrológica y meteorológica del sector, vale decir, en un año normal la productividad del glaciar será menor que en un año seco; Así mismo, el análisis de la productividad también depende de si es para todo un año o si es solo durante el periodo de deshielo, estación en la cual se produce la mayor cantidad de derretimiento de nieve y deshielo en la cuenca.

En términos más concretos, en la actualidad en un análisis anual, el promedio de los últimos 25 años da que el 9% del escurrimiento corresponde a aporte glaciar, mientras que si el análisis es respecto al periodo de deshielo el aporte sube a un 15% (ambos valores como promedio). A pesar de que son cifras concretas, es necesario bajarlas un poco hacia la comprensión del medio físico. Dado que no se puede hacer un análisis mensual o diario (porque el balance glaciar es anual), los porcentajes de aporte de los glaciares representan una generalidad. En la visita a terreno realizada durante el mes de febrero se pudo constatar que en algunos tramos de tiempo (días, semanas) del periodo de deshielo, el aporte de los glaciares es prácticamente el único aporte que existe al escurrimiento del río, de lo que entonces se puede concluir: por un lado está lo matemáticamente posible y por otro lado está lo físicamente posible. A pesar de los resultados de las ecuaciones (promedios), la realidad indica que existen periodos en que el río es 100% aporte glaciar.

La productividad de los glaciares hacia el futuro dependerá del escenario de cambio climático en el cual se sitúe la zona de estudio(o el planeta en general). Según los datos existentes de retroceso glaciar, se pueden determinar distintos escenarios de retroceso hacia el futuro, desde los más extremos hasta los más moderados considerando lo físicamente posible y la literatura existente. Una vez determinado esto (escenarios de retroceso glaciar), los escenarios de cambio climático según sus características se situaran cerca de los extremos de estas posibilidades. La Figura 7-1 nos muestra el volumen perdido de los glaciares en  $m^3/s$  como promedio anual, mientras que la Figura 7-2 la misma situación pero como promedio del periodo de deshielo. Para ambas figuras vemos que durante la década del 90 el comportamiento pareciera estar más cerca de un escenario moderado (símil a un escenario RCP2.6) y que la continuidad de la línea de retroceso seguiría por la línea moderada (roja), sin embargo desde la última década hemos visto una aceleración en el retroceso glaciar que se acerca mucho más a un escenario extremo de retroceso (símil a un escenario RCP8.5). Ahora bien, afirmar si estamos en uno u otro escenario, aun no es posible con los datos que tenemos, ya que el aumento del retroceso aún podría situarse en un plano intermedio entre los símiles de los escenarios RCP8.5 y RCP2.6.

Tanto para el periodo anual como para el periodo de deshielo, ante un escenario RCP8.5 el caudal disponible debería aumentar producto del retroceso acelerado de los glaciares y debería ser mayor al disponible que en un escenario RCP2.6, sin embargo hacia finales del siglo las tendencias deberían invertirse y bajo un escenario RCP2.6 habría más caudal que bajo un escenario RCP8.5. Esto quiere decir que el escenario RCP2.6 bajo todo punto de vista es mucho más sustentable en el tiempo que un escenario RCP8.5.

## 7.1 Periodo anual

Si realizamos un análisis del periodo anual con las implicancias de cambio climático (retroceso glaciar, aumento temperatura, baja en la precipitación, etc.), para el escenario RCP2.6 y el escenario RCP8.5 hacia el año 2040 se ve una baja de hasta  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$  en promedio, mientras que hacia el 2070 podrían ser casi  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  para el escenario RCP2.6 y  $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$  para el escenario RCP8.5 en promedio. Al comparar con los  $8.7 \text{ m}^3/\text{s}$  que tenemos de promedio en los últimos 25 años, al año 2040 habría una baja en el caudal del 9% y hacia el 2070 de un 36% para el escenario RCP2.6 y de un 41% para el escenario RCP8.5. Los escenarios del 2070 son comparables con años secos, vale decir el promedio anual tendrá un comportamiento parecido (o con un poco menos de caudal) al promedio de los años secos.

El aporte glaciar para el promedio anual, según el escenario y lo explicado anteriormente, tiene dos análisis. La Figura 7-1 considera la pérdida neta, vale decir sin pérdidas por sublimación, de los glaciares; El aporte glaciar en términos de caudal para el escenario RCP8.5 pasaría a un máximo de  $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$  en menos de dos décadas y hacia el año 2070 menos de  $1.4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Hacia finales de siglo el caudal aportante podría llegar a ser solo  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

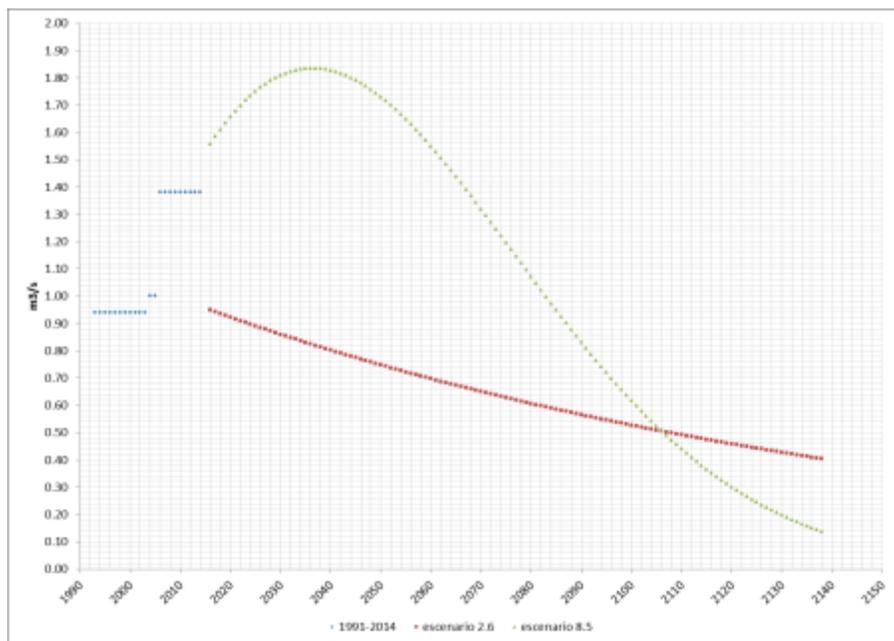


Figura 7-1 Caudales producto de la pérdida de volumen a causa del retroceso glaciar en varios escenarios en el periodo anual

En términos porcentuales para el periodo anual, en el escenario RCP2.6 cuando se trate de un año seco el aporte glaciar subirá de hasta un 15% a un 25 % (con respecto a condiciones actuales). Para el escenario RCP8.5 el aporte glaciar podría llegar a ser el 60% del caudal total en años secos; Si se da esta condición, entonces la sustentabilidad de la cuenca en el largo plazo podría peligrar, ya que cuando dejen de existir gran parte de esta masa glaciar, no será posible tener este aporte en años secos.

## 7.2 Periodo de deshielo

El análisis para el periodo de deshielo es más crítico, ya que para un escenario RCP8.5 el caudal promedio hacia el periodo 2040-2070 podría llegar a ser de hasta  $5.5 \text{ m}^3/\text{s}$  menos que el promedio histórico. Dado que el promedio durante estos últimos 25 años se sitúa en  $13.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , tendríamos una disminución cercana al 40% del caudal.

La diferencia de disponibilidad según el escenario (RCP2.6, RCP8.5) podría llegar a ser de hasta  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , en donde el escenario RCP8.5 da mayor disponibilidad de caudal que el escenario RCP2.6, pero al igual que en el promedio anual, esta es la opción menos sustentable.

Según la Figura 7-2 en el escenario RCP2.6 para el periodo de deshielo, el aporte glaciar pasara de  $1.7 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$  hacia el 2070, mientras que para el escenario RCP8.5 pasara de un aporte de  $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$  a máximos de hasta  $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$  y posteriormente hacia el 2070 tendremos aportes de  $2.7 \text{ m}^3/\text{s}$ . Hacia finales de siglo el aporte será de  $0.3$  a  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

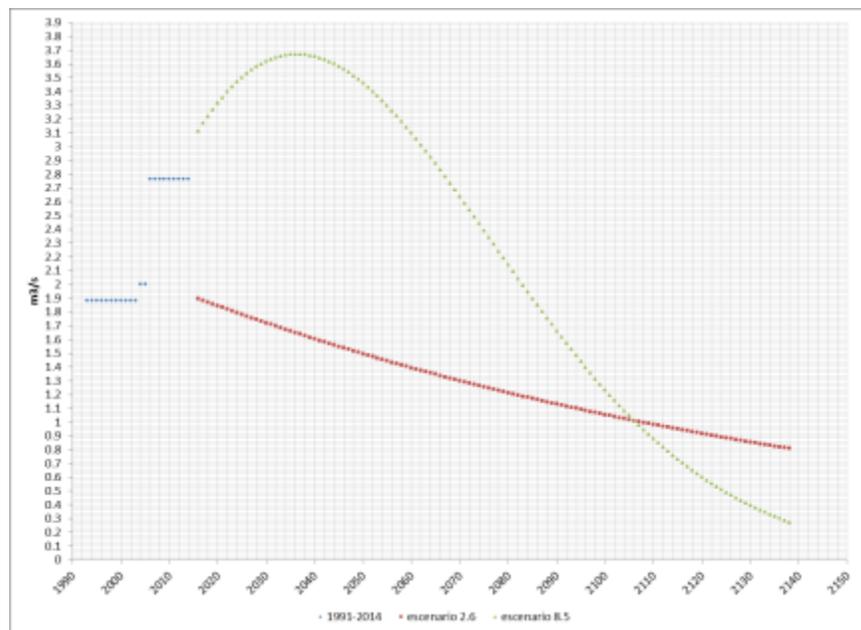


Figura 7-2 Caudales producto de la pérdida de volumen a causa del retroceso glaciar en varios escenarios en el periodo de deshielo.

En términos porcentuales, si el aporte glaciar en promedio es de un 12% para el periodo de deshielo en la serie histórica, para el escenario RCP2.6 en el periodo de deshielo hacia el periodo 2040-2070 será cercano al 20% y en casos extremos de sequía hasta el 50%. En el escenario RCP8.5 para el periodo de deshielo el aporte será cercano al 30%, y en años extremadamente secos podría llegar incluso al 90%.

En términos físicos, los datos observados en terreno mostraron que el aporte de los glaciares en los últimos meses del periodo de deshielo, cuando no se registran precipitaciones, es casi del 100% del escurrimiento del río. Esto implica que para escenarios extremos de retroceso glaciar, el caudal del río Olivares verá mermada su capacidad en un gran porcentaje.

### **7.3 Aspectos principales del modelo**

Todos los modelos tienen fortalezas y debilidades y es necesario realizar un análisis de los aspectos críticos del estudio. El modelo logro generar las series de tiempo necesarias para cumplir con los objetivos, sin embargo es importante destacar cuales son los principales aspectos a mejorar:

- El balance que se hace en el estudio es anual, por lo que es bastante general y el error puede ser más elevado que en balances diarios o mensuales. Realizar un balance diario o mensual era complejo para esta etapa, ya que la información glaciar con la sé que cuenta es anual y en algunos casos ni si quiera todos los años. Uno de los aspectos a mejorar seria lograr una mejor interpretación del deshielo para generar un balance mensual.
- Dado lo anterior hay aspectos físicos que las ecuaciones no pueden recrear, como por ejemplo, se constató en terreno que hacia finales del periodo de deshielo, ya no existía cobertura nival, por lo que el caudal del río se debía netamente al aporte glaciar. Con un estudio mensual se podría determinar una proyección de caudales más exacta hacia el futuro.
- La cobertura nival fue un gran desafío para este estudio, sin duda es uno de los aspectos a mejorar, dado que el modelo toma la precipitación que se genera en una banda de altura y genera una precipitación de referencia para las ecuaciones del modelo. Aunque el método funciona, en algunos casos se pueden generar algunas incongruencias, por lo que uno de los aspectos a mejorar es realizar un estudio por varias bandas de elevación y unirlo a un modelo de estimación de cobertura nival que utilice imágenes satelitales.
- La cuenca es bastante grande, por lo que los valores referenciales de los parámetros no necesariamente son representativos para toda la cuenca, si bien es cierto, los parámetros funcionaron bien, un mejor ajuste podría permitir una calibración con menos error.
- Aunque se contó con una gran cantidad de material producto de estudios en glaciares y campañas en terreno, existen varios supuestos dada la complejidad de mapear completamente los glaciares. Tanto los volúmenes como las áreas, son estimaciones más o menos precisas pero en ningún caso exactas.
- El caudal utilizado para calibrar el modelo es una estimación del caudal en régimen natural, ya que en la actualidad parte de este caudal es ocupado en generación de energía.

Uno de los aspectos a mejorar en este punto apunta a obtener los datos de caudal consumidos por la central eléctrica en sus procesos, con lo que se podría obtener mayor precisión en la calibración.

- Con respecto a la cantidad de datos usados, siempre es mejor tener más datos, sin embargo la cuenca cuenta con no más de 25 años de datos, lo que generó una limitación evidente tanto para la calibración como para la validación.

Finalmente, es necesario destacar que tanto el modelo como el estudio (ambos totalmente perfectibles), cumplen con el objeto fundamental de establecer cuál es la valoración numérica de la productividad de los glaciares en la Cuenca del Río Olivares y la proyección de esta hacia la principio de la segunda mitad del siglo considerando los efectos del cambio climático. El estudio constituye una base (no la única) para continuar con la investigación hidrológica de la cuenca incluyendo el aporte glaciar, con datos empíricos de los glaciares de la zona.

## Bibliografía

- Aceituno, P., & Garreaud, R. (1995). Impacto de los fenómenos el niño y la niña en regímenes pluviométricos andinos. *Revista chilena de Ingeniería Hidráulica*, 33-43.
- Alean, J., & Hambrey, M. (20 de 10 de 2006). *Piedmont glacier*. Obtenido de Glaciers online: <http://www.swisseduc.ch/glaciers/glossary/piedmont-glacier-en.html>
- Baraer, M.; Mark, B.; McKenzie, J.; Condom, T.; Bury, J.; Rathay, S.; Huh, K.; Portocarrero, C.; Gómez, J. (2012). Glacier recession and water resources in Peru's Cordillera Blanca. *Journal of glaciology*, 58(207), 134-150.
- Bogan, T., Mohseni, O., & Stefan, H. (2003). Stream temperature-equilibrium temperature relationship. *water resources research*, 39(9).
- Bown, F., Rivera, A., & Acuña, C. (2008). Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, 48(1), 43-48.
- Bustos, D. (2011). *Cambio climático y eventos de emergencia en el suministro de agua potable en el gran santiago*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago. Chile.
- Cabrera, C. (2008). *Análisis de las escorrentías mensuales y anuales de la cuenca del maipo y la potencial influencia glacial en la producción de agua*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Escuela de Ingeniería Forestal. Universidad de Talca. Talca. Chile.
- CADE-IDEPE. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Maipo*. Santiago: Dirección general de aguas (DGA).
- Carrasco, J., Casassa, G., & Quintana, J. (2005). Changes of the 0 °C Isotherm and Equilibrium-line Altitude in Central Chile during the Last Quarter of the 20 th Century. *Hydrological Sciences Journal*, 50(6), 933-948.
- CDEC-SIC. (2002). *Estadística de Operaciones 1991-2000*. Santiago. Chile: Centro de despacho Económico de carga. Sistema Interconectado Central.
- CDEC-SIC. (agosto de 2014). *Operación Real*. Obtenido de CDEC-SIC: <http://www.cdec-sic.cl/informes-y-documentos/fichas/operacion-real/>
- CECS. (2013). *Línea de base glaciológica para glaciares de la cuenca alta del río olivares y otras cuencas aledañas*. CODELCO.

- CECS. (2014). *Informe N° 2 de Avance: Línea de Base glaciológica para glaciares de la cuenca alta del Río Olivares y otras cuencas aledañas*. CODELCO.
- CEPAL. (2012). *Proyecciones climáticas futuras y análisis de incertidumbre. En La Economía del cambio climático en Chile*. CEPAL, Naciones Unidas.
- CHILGENER S.A. (1992). *Construcción central hidroeléctrica Alfalfal*. Santiago: Gerencia ingeniería y obras.
- Codelco, División Andina. (2013). *Estudio de Impacto Ambiental "Proyecto Expansión Andina 244"*. Región de Valparaíso.
- Cortés, G. C. (2010). *Evaluación de un modelo Hidrológico semi distribuido para la estimación de la escorrentía de deshielo en el Río Juncal*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago. Chile.
- DGA. (2009). *Estrategia nacional de glaciares, Fundamentos*. Santiago, Chile.
- DGA. (2011b). *Variaciones recientes de glaciares de Chile, según principales zonas glaciológicas*. Santiago, Chile.
- Dirección Meteorológica de Chile. (2014). *Climas Región de Valparaíso*. Obtenido de Meteochile: [http://www.meteochile.cl/climas/climas\\_quinta\\_region.html](http://www.meteochile.cl/climas/climas_quinta_region.html)
- Garreaud, R. (1992). Estimación de la altura de la línea de nieve en cuencas de Chile central. *Revista chilena de Ingeniería Hidráulica*(7), 21-32.
- Garreaud, R. (2011). Cambio Climático: Bases Físicas e Impacto en Chile. *Tierra Adentro - INIA*(93).
- Garreaud, R., & Meruane, C. (2005). *Introducción a la Meteorología y Oceanografía, Módulo 2: Flujos Radiativos*. Santiago: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geofísica.
- GEOESTUDIOS. (2012-2013). *Los glaciares de la cuenca alta del Río Blanco y la minería*. V REGIÓN: CODELCO .
- GEOESTUDIOS-DGA. (2011). *Catastro, Exploración y estudio de glaciares en Chile Central*. Santiago, Chile: DGA.
- IPCC. (2001). *Glossary of Terms*. Obtenido de Working Group II: Impacts, Adaptation and Vulnerability: <https://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-sp.pdf>
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Suecia.
- IPLA-Ingenieros consultores. (1983). *Balance Hidrológico nacional Regiones V,VI, VII y Metropolitana*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.

- Kalthoff, N., Fiebig-Wittmaack, M., Meißner, C., Kohler, M., Uriarte, M., Bischoff-Gauß, I., y otros. (2006). The energy balance, evapo-transpiration and nocturnal dew deposition of an arid valley in the Andes. *Journal of Arid Environments*(65), 420-443.
- Lenaerts, J., Angelen, J., Van den Broeke, M., Gardner, A., Wouters, B., & Van Meijgaard, E. (2013). Irreversible mass loss of Canadian Arctic Archipelago glaciers. *Geophysical research letters*, 40, 870-874.
- Leydecker, A., & Melack, J. (2000). Estimating evaporation in seasonally snow-covered catchments in the Sierra Nevada, California. *Journal of Hydrology*(236), 121-138.
- Lliboutry, L. (1956). *Nieves y Glaciares de Chile: Fundamenteos de glaciología*. Ediciones Universidad de Chile.
- Lutgens, F., & Tarbuck, E. (2010). *The Atmosphere. An Introduction to Meteorology*. New Jersey: Prentice hall.
- Martínez, N. (2010). *Reconstrucción del equivalente en agua de la cobertura nival en la cuenca alta del río aconcagua. Empleo de imágenes Modis*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago. Chile.
- Monckeberg, J. P., & Rivera. (2007). *Un modelo estocástico espacial para la precipitación mensual en la cuenca del río maipo: aplicación para relleno estocástico condicionado y simulación de series sintéticas espaciales*. Santiago: DGA.
- Oberreuter, J., Uribe, J., Zamora, R., Gacitua, G., & Rivera, A. (2014). Mediciones de espesor de hielo en Chile usando radio eco sondaje. *GEOACTA*(39), 108-122.
- Pérez, J. D. (2011). *Riesgo de inundación producto del cambio climático. Caso de estudio: Quebrada San Ramón*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago. Chile.
- Postigo, J., Chacón, P., Geary, M., Blanco, G., Fuenzalida, M., De la Cuadra, F., y otros. (2013). *Cambio climático, movimientos sociales y políticas públicas* (ICAL ed.). Santiago, Chile: CLACSO.
- Rivera, A., Casassa, G., Acuña, C., & Lange, H. (2000). Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Invest. geogr.*(34), 29-60.
- Rojas, M. (2012). *Estado del arte de modelos para la investigación del calentamiento global. Informe para Opciones de Mitigación para enfrentar el Cambio Climático*. MAPS Chile.
- SERNAGEOMIN. (15 de 09 de 2014). *Visualizador de mapas*. Obtenido de Portal GEOMIN: <http://geoportal.sernageomin.cl/geovisor/GeoVisor/index.html>

- Serrano, R. (2014). *Proyecciones de disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del maipo, bajo escenarios recientes de cambio climático*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile. Santiago. Chile.
- Superintendencia de servicios sanitarios (SISS). (2013). *Informe de Gestión del Sector Sanitario*. Chile: Gobierno de Chile.
- UNESCO. (2011). *Glossary of Glacier Mass Balance and related Terms*. Paris: UNESCO's workshop.
- Universidad de Chile. (2011). *Investigación de los aportes nivoglaciares en algunas cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Rapel, Y estimación de los efectos del cambio climático*. Santiago: DGA.
- Universidad de Chile. (2011). *Selección y aplicación de un modelo hidrológico para estimar los impactos del cambio climático en la generación de energía del sistema interconectado central*. Santiago, Chile: Subsecretaría de Energía, Ministerio de Energía.
- Vargas, X. (2012). *Evaporación. Clases de Hidrología*. Santiago: Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile.
- WGMS. (2012). *Preliminary glacier mass balance data 2011/2012*. Obtenido de world glacier monitoring service: <http://www.geo.uzh.ch/microsite/wgms/mbb/sum12.html>
- Winkler, M., Juen, I., Mölg, T., Wagnon, P., Gomez, J., & Kaser, G. (2009). Measured and modelled sublimation on the tropical glacier Artesonraju, Perú. *The Cryosphere*, 3, 21-30.

## **8. ANEXOS**

# Anexo I

## Evaporación

Para el cálculo de la evaporación se pueden utilizar varias fórmulas (Vargas, 2012) que necesitan de distintos parámetros para su determinación:

Balance de Energía:

$$E_r = \frac{R_n}{l_v \rho_\omega} \quad (8-1)$$

$$l_v = 2.501 * 10^6 - 2370 * T \quad (8-2)$$

En donde:

$E_r =$  Tasa de evaporación [ m/s ]

$R_n =$  Radiación neta [ W/m<sup>2</sup> ]

$l_v =$  Calor latente de vaporización [ J /Kg ]

$\rho_\omega =$  Densidad del agua [Kg/m<sup>3</sup> ]

$T =$  Temperatura [°C]

Método aerodinámico:

$$B = \frac{0.622 * k^2 * \rho_a * u_2}{P * \rho_\omega [\ln (z_2/z_0)]^2} \quad (8-3)$$

$$e_{as} = 611 * e^{\left(\frac{17.27 * T}{237.3 + T}\right)} \quad (8-4)$$

$$e_a = e_{as} * HR \quad (8-5)$$

$$E_a = B * (e_{as} - e_a) \quad (8-6)$$

En donde:

$E_a =$  Tasa de evaporación aerodinamica [ m/s ]

$k =$  Constante de Von Karman

$u_2 =$  velocidad del viento [ m/s ]

$\rho_a =$  Densidad del aire [Kg/m<sup>3</sup> ]

$P =$  Presión atmosférica [Pa]

$z_2 =$  altura sobre la superficie líquida [m]

$z_0 =$  Altura de aspereza [m]

$e_{as} =$  Presión de vapor saturado [Pa]

$e_a =$  Presión de vapor del aire [Pa]

$HR =$  Humedad relativa

Método combinado:

$$E = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} * E_a \quad (8-7)$$

$$\Delta = \frac{4098 * e_{as}}{(237.3 + T)^2} \quad (8-8)$$

$$\gamma = \frac{C_p * K_h * P}{0.622 * l_v * K_w} \quad (8-9)$$

En donde:

$\Delta =$  gradiente de la curva de presión de vapor saturado [Pa/°C]

$\gamma =$  Constante psicrométrica [Pa/°C]

$C_p =$  Calor específico a presión constante [J/(Kg°C)]

$K_h =$  Coeficiente de difusión turbulenta de calor

$K_w =$  Coeficiente de difusión turbulenta de masa

$E =$  Evaporación combinada de balance de energía y método aerodinámico [m/s]

Método de Priestley-Taylor:

$$E_{pt} = \alpha * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * E_r \quad (8-10)$$

En donde:

$$E_{pt} = \text{Evaporación de Priestley – Taylor [ m/s]}$$

$$\alpha = \text{Constante} = 1.3$$

Para la determinación de la evaporación con los 4 métodos se ocuparon dos estaciones meteorológicas de la DGA, una de ellas en la cuenca del Río Olivares y la otra en el sector de Yerba Loca. La adopción de la estación de Yerba Loca fue por su similitud en términos de viento y radiación con la de la cuenca del río Olivares. Otras estaciones se testearon pero no tenían condiciones similares a la de la cuenca del río Olivares, una de ellas fue la estación meteorológica del glaciar San Francisco (Estación Glaciar San Francisco Aguas Panimavida). Otra de las estaciones testeadas es la estación meteorológica del glaciar Olivares Gamma, que se encuentran en la cuenca del Río Olivares, sin embargo por su ubicación y cantidad de datos (solo unos meses) no es tan representativa para valores promedio de toda la cuenca, pero si para los glaciares de la zona. Las estaciones consideradas fueron:

Nombre	Latitud	Longitud
Valle Olivares	33° 11' 13" S	70° 06' 44" W
Estero Yerba Loca Piedra Carvajal	33° 13' 17.74" S	70° 16' 25.61" W

Tabla 8-1 Estaciones Meteorológicas para el cálculo de la evaporación

La razón por la que se ocuparon dos estaciones meteorológicas es debido a que la estación en el Valle Olivares a la fecha contiene poca información por ser una estación nueva. Para la estación Valle Olivares se tomaron los datos existentes entre mayo y octubre del 2014 y para la estación Estero Yerba Loca Piedra Carvajal se tomaron los datos correspondientes a 1 año completo. En el caso de la primera estación la información se segmentó en el periodo correspondiente mayo-septiembre y mayo-octubre, considerando que octubre pertenece al periodo de deshielo de la cuenca; Para la otra estación se hicieron 4 segmentos, el primero con los datos anuales y los demás con los datos del periodo de deshielo, periodo lluvioso y los datos de mayo a octubre. La segmentación se realizó para comparar tendencias entre ambas estaciones y en distintos periodos, de esta forma se completó la tendencia para el valle Olivares.

En particular cada estación mide humedad relativa, viento, temperatura y radiación (dentro de los parámetros que interesan para este capítulo), sin embargo la componente de radiación que mide cada estación es diferente, por lo que se debió realizar una serie de ajustes. La estación Valle Olivares mide radiación de onda corta y larga, pero ambas incidentes y la estación de Yerba Loca Piedra Carvajal (Estación Yerba Loca de acá en adelante) mide Radiación de onda corta y larga neta. Para la determinación de la evaporación en cada estación fue necesario primero determinar cada uno de los parámetros que modelan a las ecuaciones antes vistas.

En la ecuación (8-1) para la densidad del agua se adoptó un valor de 997 [kg/m<sup>3</sup>] (Vargas, 2012) y en lo que respecta a la radiación neta se consideró la descomposición de la radiación tanto

incidente como reflejada para la onda corta y contra radiación y emisión para la onda larga (Garreaud & Meruane, 2005), por lo tanto la radiación neta queda como:

$$R_n = (RS \downarrow - RS \uparrow) + (ROL \downarrow - ROL \uparrow) \quad (8-11)$$

En donde:

$RS \downarrow =$  Radiación solar incidente sobre la superficie (onda corta)

$RS \uparrow =$  Radiación solar reflejada por la superficie (onda corta)

$ROL \downarrow =$  Contra radiación atmosférica (onda larga)

$ROL \uparrow =$  Emisión de la superficie (onda larga)

Cada par de componentes de radiación forman la radiación neta de onda larga y onda corta respectivamente, de tal forma que se puede señalar que la radiación neta es la suma de la radiación neta de cada onda, por lo tanto para el caso de una de las estaciones meteorológicas basta con sumar los valores para obtener la radiación neta. Para obtener los valores de radiación reflejada tanto de onda corta como de onda larga, cuando no se obtenga de las estaciones por si sola, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$RS \uparrow = -a RS \downarrow \quad (8-12)$$

En donde

$a =$  Albedo

El albedo se define como la fracción de la radiación incidente que es reflejada, puede variar desde 0.95 para la nieve fresca hasta 0.05 para suelos mojadas oscuros. En el caso de la cuenca se determinó un albedo de 0.4 según las características de flora y fauna de la zona (Garreaud & Meruane, 2005).

En tanto la ley de Stefan-Boltzmann permite calcular la radiación reflejada de onda larga:

$$ROL \uparrow = \epsilon_{ir} * \sigma_{SB} * T_0^4 \quad (8-13)$$

En donde:

$\epsilon_{ir} =$  Emisividad infraroja

$\sigma_{SB} =$  Constante de Stefan – Boltzmann [ $W / K^4 m^2$ ]

$T_0 = \text{Temperatura del suelo } [^{\circ}K]$

La constante de Stefan-Boltzmann es igual a  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4]$  y en el caso de la emisividad se obtuvo un valor igual a 0.93 de acuerdo a las características de la zona (Garreaud & Meruane, 2005).

Para la ecuación (8-3) correspondiente al balance aerodinámico, a la constante de Von Karman (k) se le asignó un valor de 0.4 y a la altura de aspereza un valor de 0.0004 [m] (Bogan, Mohseni, & Stefan, 2003). En el caso de la presión atmosférica por tratarse de una cuenca cordillerana se utilizó una relación grafica (Figura 8-1) que determinó un valor de 78000 [Pa] para la altura media (Lutgens & Tarbuck, 2010):

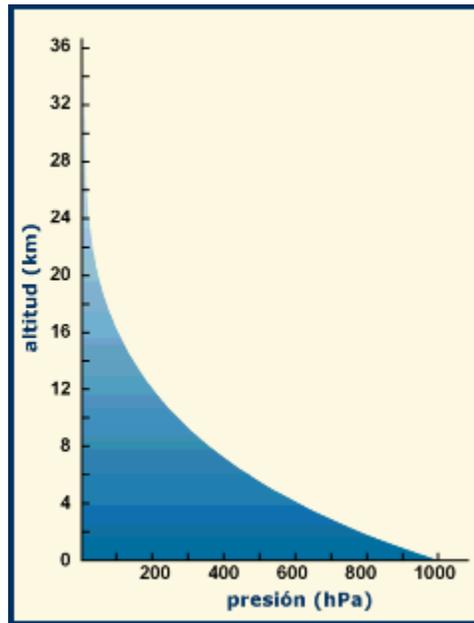


Figura 8-1 Relación de altura y presión atmosférica

Para calcular la densidad del aire se ocupó la relación de gases ideales modificada para variación en altura:

$$\rho_a = \left( \frac{P}{RT} \right) * e^{\left( \frac{-gz}{RT} \right)} \quad (8-14)$$

En donde

$$R = \text{Constante de los gases } \left[ \frac{J}{Kg * K} \right]$$

$$z = \text{altura sobre el nivel del mar } [m]$$

$$g = \text{Aceleración de gravedad } [m/s^2]$$

Para este caso la temperatura se mide en ° Kelvin.

Para la ecuación (8-9) la relación entre el coeficiente de difusión turbulenta de calor y de masa se adopta igual a la unidad y el calor específico tiene un valor de 1005 [J/kg°C] (Vargas, 2012).

Los resultados de evaporación para valores diarios en cada uno de los métodos están en la Figura 8-2 y en la Figura 8-3:

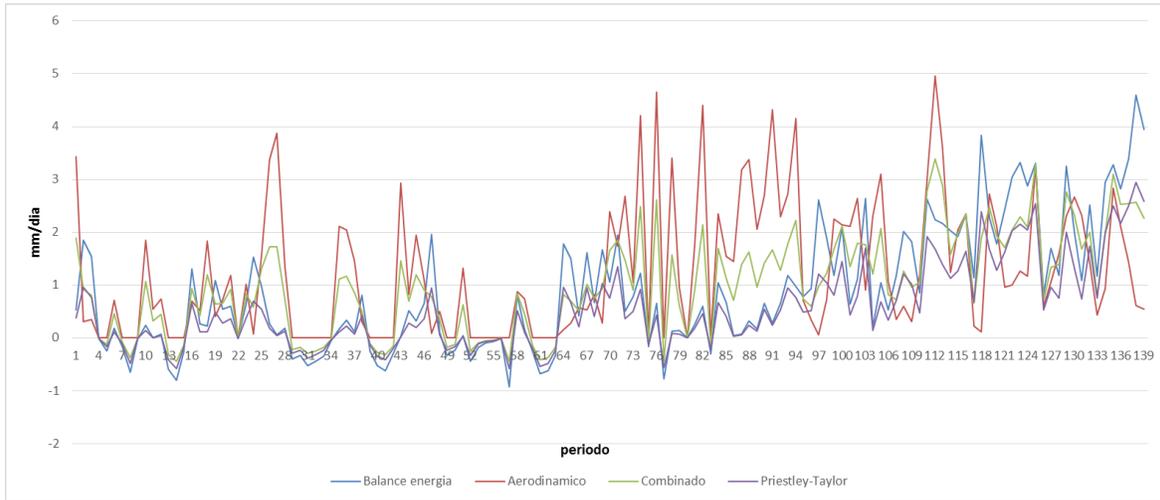


Figura 8-2 Evaporación en la Estación Valle Olivares. Mayo- octubre

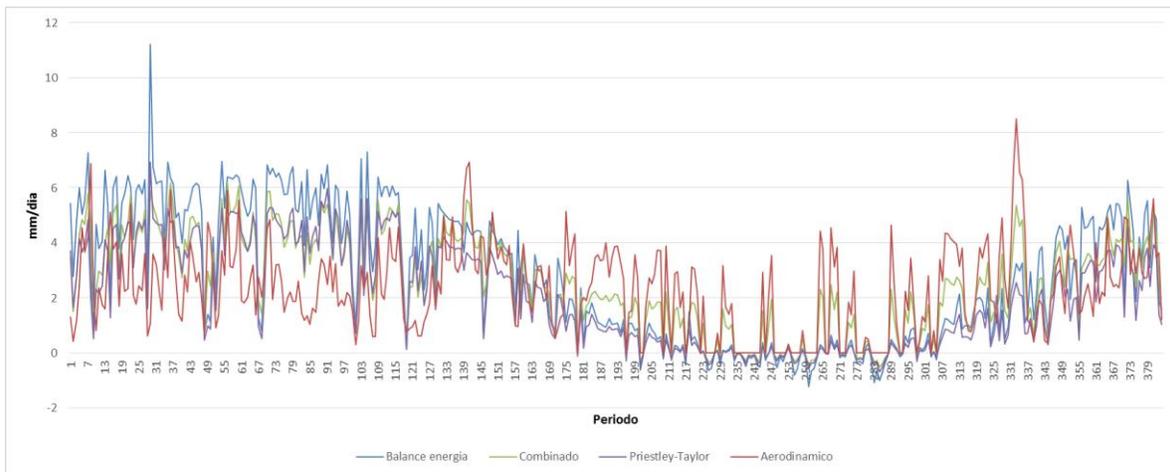


Figura 8-3 Evaporación en la Estación Yerba Loca en un periodo de un año.

En el caso de la estación de Yerba Loca en invierno el método aerodinámico se aleja más de la realidad producto de que considera el viento como un factor importante y no la radiación, al omitir este método se ve de manera más clara la curva esperada entre un año de mediciones:

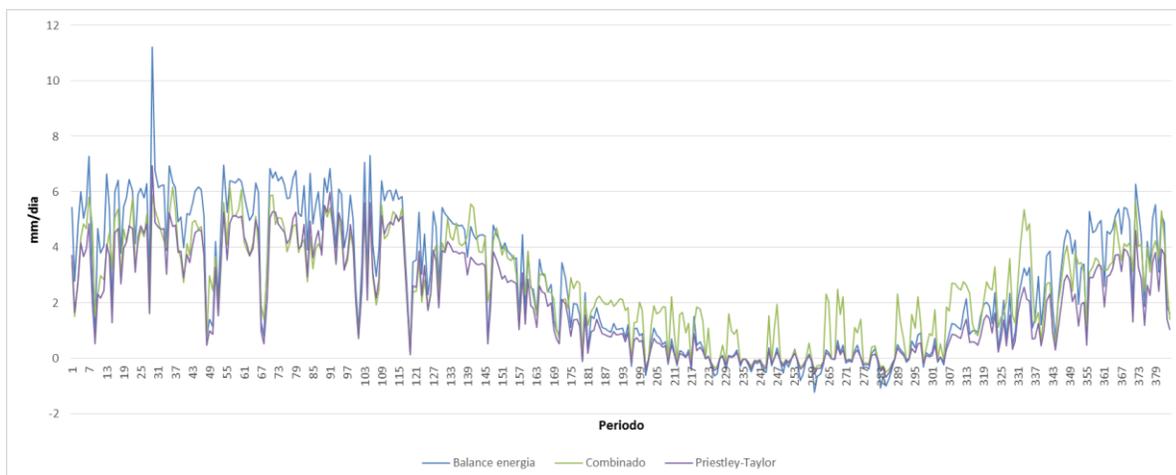


Figura 8-4 Evaporación en la Estación Yerba loca en un periodo de un año para tres métodos

Con los valores de ambas estaciones se obtuvieron promedios para el periodo de deshielo, lluvioso y el promedio anual. La correlación del periodo de lluvioso de la estación Olivares con la estación Yerba Loca fue mejor para los métodos de balance energético y Priestley-Taylor, por lo que se adoptaron estas fórmulas. En la siguiente tabla se pueden ver los resultados para cada método y los periodos considerados para las estaciones:

Periodos	Balance E. [mm/día]	Aerodinámico [mm/día]	Combinado [mm/día]	PT [mm/día]
Mayo-oct VO	0.870	1.242	1.013	0.556
Mayo- oct YL	0.791	1.662	1.204	0.495
Mayo-sept VO	0.768	1.232	0.953	0.482
Abril -Sept YL	0.745	1.832	1.249	0.487
Oct-Mar YL	4.686	2.719	3.853	3.545
Anual YL	2.767	2.315	2.590	2.033

Tabla 8-2 Resultados de evaporación (mm/día) para las estaciones meteorológicas VO y YL bajo diferentes métodos

Una vez obtenidos los resultados se hizo la correlación para obtener un valor representativo de la evaporación para la cuenca del Río Olivares. Al analizar los datos para cada método, nuevamente el método de balance energético y el de Priestley-Taylor fueron los más consistentes. En la Tabla 8-3 se ven los resultados para cada método.

Resultado VO	Balance E. [mm/día]	Aerodinámico [mm/día]	Combinado [mm/día]	PT [mm/día]
Anual	3.05	1.73	2.18	2.29
Periodo de deshielo	5.16	2.03	3.24	3.99
Invierno( Abril-sept)	0.82	1.37	1.05	0.55

Tabla 8-3 Evaporación (mm/día) en la Estación valle Olivares bajo diferentes métodos

Según los datos de la estación Huechún de Codelco Andina, existe un registro de 903 mm/año (Codelco, Division Andina, 2013) para la evaporación desde un espejo de agua, por lo que el método de Priestley-Taylor es el que más se ajusta dadas las características de la zona.

Considerando que los métodos usados miden evaporación desde un espejo de agua o suelo desnudo, vale decir, siempre y cuando existe masa para evaporar, la evaporación real será menor a la determinada. La evaporación real será no menor a un 60% de la determinada por los métodos o evaporación potencial (Kalthoff, et al. , 2006). Desde el río existe una evaporación constante, porque el río presenta caudal todo el año. Los resultados para la evaporación estan en la Tabla 8-4:

Parámetros	Anual	Periodo de deshielo (Oct -Mar)
Evaporación promedio [mm/día]	2.29	3.99
Evaporación Real [mm/año]	668	582
Largo Río[m]	50000	50000
Ancho del Río [m]	10	15
Evaporación del Río [m <sup>3</sup> /día]	1143	2991

*Tabla 8-4 Evaporación Anual y diaria para la cuenca del Río Olivares*

Finalmente se consideró un valor del 80% de la evaporación potencial (evaporación de termina por los métodos) como evaporación real. Más adelante, en la etapa de calibración se ajustará este valor para los años más secos, de tal forma que si la evaporación es mayor a un 65% de la precipitación (Kalthoff, et al. , 2006), el porcentaje de evaporación real anual de cada año hidrológico se ajuste a valores coherentes con la realidad.

# Anexo II

## Precipitaciones

Considerando que para la evaluación anual del año hidrológico, las estaciones no tienen sus años completos, se procedió a realizar un relleno de datos. Según la Tabla 8-5 la estación Terrazas Centrales DGA es la más completa. Para realizar un relleno de los datos faltantes se utilizaron comparaciones estadísticas entre las estaciones y se ocuparon estudios disponibles en la DGA de relleno estocástico de precipitación (Monckeberg & Rivera, 2007) y estudios de rellenos de estadística de precipitación de la cuenca del Maipo (Cabrera, 2008).

Año hidrológico	Estaciones [mm]				
	Maitenes	DGA	San José Reten	Riecillos	Emb. Yeso
1991-1992	X	392.1	x	839.2	935
1992-1993	X	406.3	564.5	564.5	x
1993-1994	X	299.1	496	641.7	634.2
1994-1995	X	x	x	344.1	549.6
1995-1996	261.6	190.2	x	x	379.9
1996-1997	184.1	188.2	233	203.7	167.8
1997-1998	970	742	1010	x	1222.7
1998-1999	112.2	127.5	144.5	105	202.9
1999-2000	327.2	359.8	393.5	437	496
2000-2001	625.5	496.5	734.5	682	1158.2
2001-2002	526.9	342.3	553.5	540.9	831
2002-2003	753.1	621.8	862.1	883.8	1254.7
2003-2004	311.5	242.2	379.5	340.6	506.3
2004-2005	390.3	386.5	459	476.6	503.6
2005-2006	733.7	487.8	764.4	988.8	1186.6
2006-2007	X	399.1	511	660.2	684
2007-2008	X	193.2	304	411.9	502.6
2008-2009	531.6	362.6	690	747.3	935.2
2009-2010	430.8	285.9	x	383.4	632.6
2010-2011	358.3	269.1	310.1	280.5	469.9
2011-2012	186	134.7	221.5	240.5	325.4
2012-2013	376.8	212.4	486	342.2	497.1
2013-2014	268.9	186.4	341.2	250.1	436.7

Tabla 8-5 Estadística disponible para las estaciones Pluviométricas del estudio

Según estudios de la DGA (Monckeberg & Rivera, 2007) existe una correlación importante entre la estación Maitenes bocatoma (de ahora en adelante simplemente estación Maitenes) y la estación Terrazas Centrales DGA (de ahora en adelante estación DGA), así como también entre la estación San José de Maipo Retén (de ahora en adelante estación San Jose) y la estación San José de Maipo de la DMC, llegando esta última a casi un 99%. Para el caso de la estación El Yeso Embalse (de

ahora en adelante estación el Yeso) el estudio de la DGA propone una correlación con la estación San Gabriel, sin embargo, para este caso el relleno de información no fue tan complejo ya que al realizar un análisis diario este mostró que se trataba de 4 días sin información, por lo que junto con la información diaria de la estación San Gabriel y la Estación San José se pudo completar la estadística de la estación el Yeso. En el caso de la estación Riecillos se ocupó el otro método propuesto, que corresponde a buscar relaciones estadísticas, tomando en consideración las estaciones que se encuentren a alturas similares, este método también se usó para rellenar los datos de las otras estaciones y se compararon resultados de relleno para finalmente dejar un valor final. Algunos valores de la estación Maitenes posteriormente fueron calibrados para corresponderse con otros datos que se verán más adelante. Existe también una relación para la estación Maitenes que corresponde a la ecuación (8-15) que es útil para relleno mensual mediante los valores de las estaciones El Yeso y San José (Cabrera, 2008).

$$Maitenes = 1,1444 + 0.02729 * ElYeso + 0.8360934 * SanJosé \quad (8-15)$$

Una vez realizado el relleno se obtienen los valores anuales de lluvia en milímetros para cada una de las estaciones según se señala en la Tabla 4-10. Los promedios para cada estación están dentro de los valores esperados, en el caso de maitenes y DGA se ajustaron bastante bien a la información conocida, para las estaciones Riecillos y Yeso dado que el relleno fue mínimo (escala diaria) el promedio no debería verse muy afectado. La estación San José es la única que tiene un valor promedio alejado a otros estudios (Monckeberg & Rivera, 2007).

#### **Métodos para estimar estación Olivares (simulación)**

Con los datos de precipitación para las estaciones circundantes, es necesario establecer valores de precipitación para la cuenca del Río Olivares. Una de las formas es mediante un gradiente de precipitación determinado con la orografía de la zona. Para la cuenca del Río Maipo, en general, el gradiente de precipitación es de 0,2892 mm/m (Universidad de Chile, 2011). Se estableció una aplicación porcentual del parámetro relacionado con la cantidad de lluvia anual de las estaciones analizadas. La validación de los datos se realizó al comparar los datos simulados con los datos reales.

Al probar diversas metodologías se llegó finalmente a lo siguiente:

- Para la estación base se ordenan de mayor a menor las precipitaciones y se grafica junto con una distribución de Weibull.
- Una vez graficada la estación base se obtienen los valores para la probabilidad de excedencia (PE) 50% y PE 80%.

- Para todas las precipitaciones sobre el valor de PE 50% se aplica un factor 0.9, para las precipitaciones sobre PE 80% pero bajo PE 50% se aplica un factor de 0.4 y para el resto que se encuentra entre PE 80% y el teórico PE 100% se aplica un factor 0.15.
- Se obtiene la diferencia de alturas entre la estación base y la estación que a simular y se multiplica dicha referencia por el valor del gradiente, obteniendo el número que corrige mediante suma la precipitación de la estación base para llevarla a la estación simulada
- El número obtenido se multiplica por el factor que corresponda a la precipitación del año hidrológico, obteniendo el valor de precipitación para ese año hidrológico de la estación simulada.
- Finalmente se realiza un análisis de NASH-SUTCLIFFE para ver la calidad de la simulación. Es necesario considerar que un valor sobre 0.65 es considerado una simulación buena (Universidad de Chile, 2011).

La metodología se aplicó entre las estaciones de la DGA (como base) a la estación Maitenes (simulada) y de la estación Maitenes (como base) a la estación el Yeso (simulada), una vez obtenidos los resultados se puede realizar el mismo análisis pasando a la estaciones Maitenes o Yeso como base y una supuesta estación Olivares como simulada dentro de la cuenca. En el caso de la estación San José los resultados arrojaron algunos datos inconsistentes y sobreestimados en muchos casos, por lo que se determinó descartar esta estación como una estación base para realizar la estación simulada de la cuenca del río Olivares, esto sumado a los datos promedios de precipitación, dan a entender su mala calidad como predictor. La respuesta a esta dispersión puede deberse al sector encajonado en el cual se encuentra la estación y a efectos meteorológicos locales producto de la orografía del sector. Los resultados para los casos simulados se ven a continuación en los siguientes sub capítulos.

#### DGA-Maitenes

En este caso se toma la estación DGA como la estación base y se realiza una simulación de la estación Maitenes. La primera se encuentra a una altura 560 msnm y la segunda a 1143 msnm. Con los datos de la estación de la DGA se realizó la metodología descrita. Con la Figura 8-5 se obtuvieron los valores de las probabilidades de excedencia.

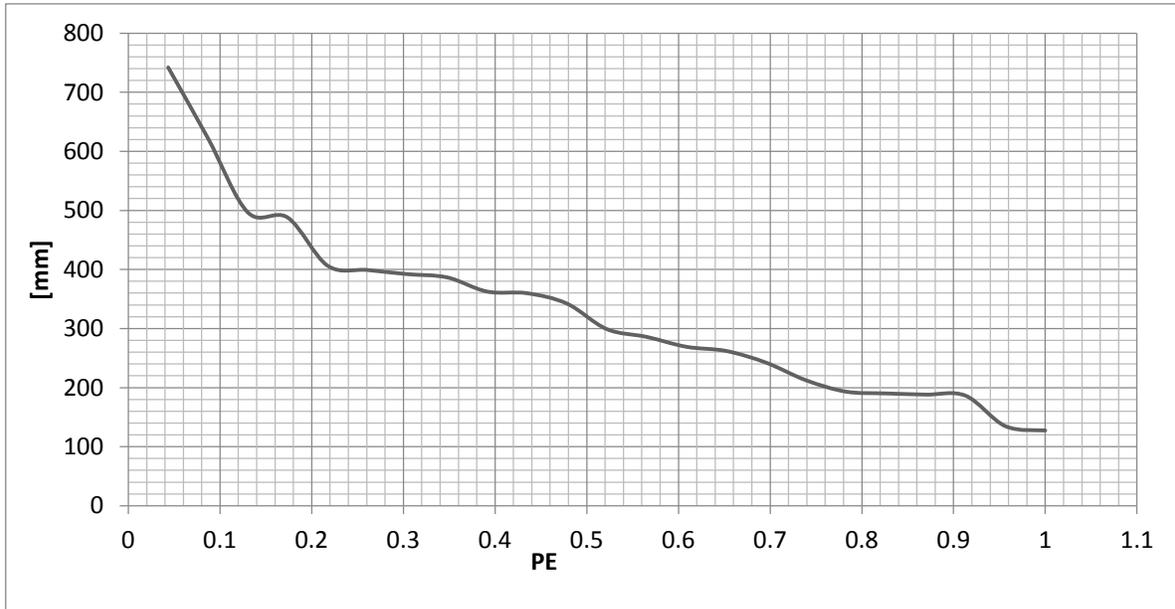


Figura 8-5 Curva de duración de precipitación anual en estación DGA

Se aplicaron los factores de corrección a la estadística y al NC (número de corrección) y se obtuvieron los datos de la Tabla 8-6

NC	168.6036		
Altura	560	1143	1143
Año hidrológico	DGA [mm]	Maitenes SIM [mm]	Maitenes real [mm]
1991-1992	392.1	543.8	646.2
1992-1993	406.3	558.0	496.2
1993-1994	299.1	366.5	439.3
1994-1995	262	329.4	409.1
1995-1996	190.2	257.6	261.6
1996-1997	188.2	213.5	184.1
1997-1998	742	893.7	970.0
1998-1999	127.5	152.8	112.2
1999-2000	359.8	511.5	327.2
2000-2001	496.5	648.2	625.5
2001-2002	342.3	494.0	526.9
2002-2003	621.8	773.5	753.1
2003-2004	242.2	309.6	311.5
2004-2005	386.5	538.2	390.3
2005-2006	487.8	639.5	733.7
2006-2007	399.1	550.8	418.3
2007-2008	193.2	260.6	242.4
2008-2009	362.6	514.3	531.6
2009-2010	285.9	353.3	430.8
2010-2011	269.1	336.5	358.3
2011-2012	134.7	160.0	186.0
2012-2013	212.4	279.8	376.8
2013-2014	186.4	211.7	268.9

Tabla 8-6 Resultados simulación de estación Maitenes en base a estación DGA

Al realizar el análisis NSE se obtuvo un valor de 0.852, por lo que se valida la simulación como un buen predictor. Para un análisis más visual la Figura 8-6 muestra el comportamiento de la simulación con respecto a los datos reales.

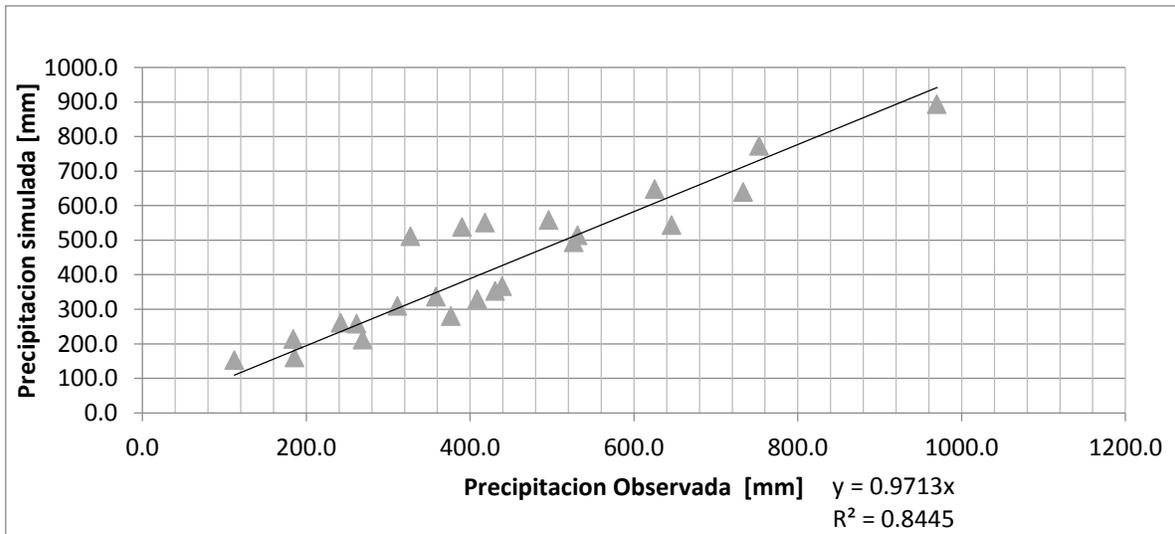


Figura 8-6 Comparación entre simulación y precipitación observada de cada Año hidrológico entre 1991 y 2014 estación Maitenes

### Maitenes Yeso

En este caso se adopta la estación Maitenes como la estación base y se realiza una simulación de la estación El Yeso. La primera se encuentra a una altura 1143 msnm y la segunda a 2553 msnm. La Figura 8-7 muestra la curva de duración de las precipitaciones anuales en la estación Maitenes

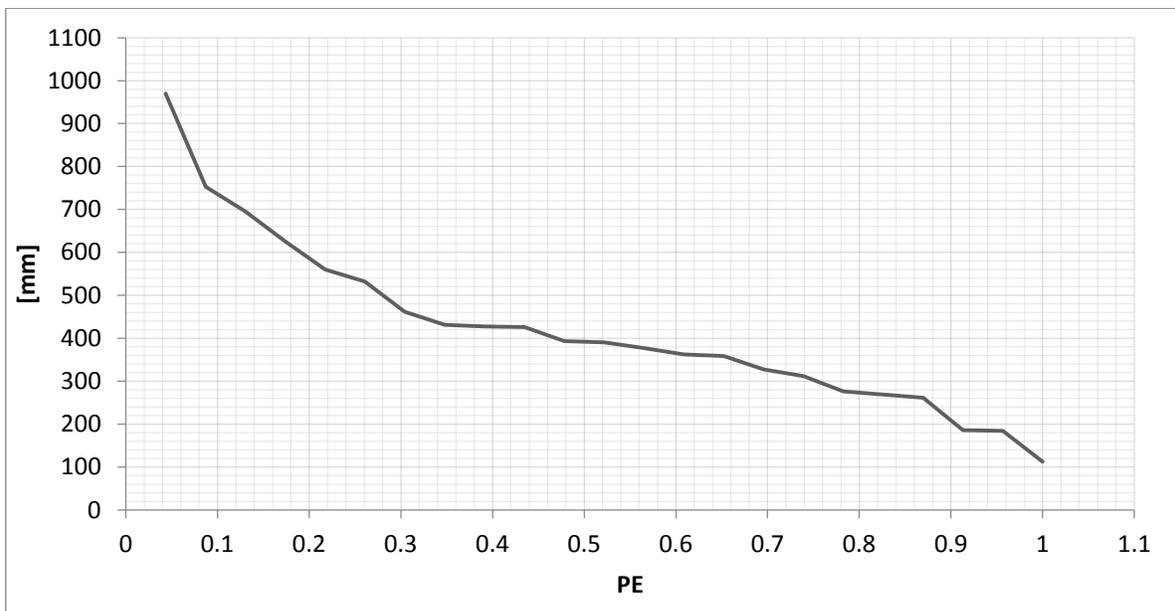


Figura 8-7 Curva de Duración de la precipitación anual en estación Maitenes

Se aplicaron los factores de corrección a la estadística y al NC (número de corrección) y se obtuvieron los datos de la Tabla 8-7.

NC	407.772		
altura	1143	2553	2553
Año Hidrológico	Maitenes real [mm]	Yeso simulado [mm]	Yeso REAL [mm]
1991-1992	646.2	1013.2	935
1992-1993	496.2	863.2	628.5
1993-1994	439.3	806.3	634.2
1994-1995	409.1	776.1	549.6
1995-1996	261.6	322.8	379.9
1996-1997	184.1	245.3	167.8
1997-1998	970.0	1337.0	1222.7
1998-1999	112.2	173.4	202.9
1999-2000	327.2	490.3	496
2000-2001	625.5	992.5	1158.2
2001-2002	526.9	893.9	831
2002-2003	753.1	1120.1	1254.7
2003-2004	311.5	474.6	506.3
2004-2005	390.3	553.4	503.6
2005-2006	733.7	1100.7	1186.6
2006-2007	418.3	785.3	684
2007-2008	242.4	303.6	502.6
2008-2009	531.6	898.6	935.2
2009-2010	430.8	797.8	632.6
2010-2011	358.3	521.4	469.9
2011-2012	186.0	247.2	325.4
2012-2013	376.8	539.9	497.1
2013-2014	268.9	330.1	436.7

Tabla 8-7 Resultados simulación de estación El Yeso en base a estación Maitenes

Al realizar el análisis NSE se obtuvo un valor de 0.854, por lo que se valida la simulación como un buen predictor. Para un análisis más visual la Figura 8-8 muestra el comportamiento de la simulación con respecto a los datos reales.

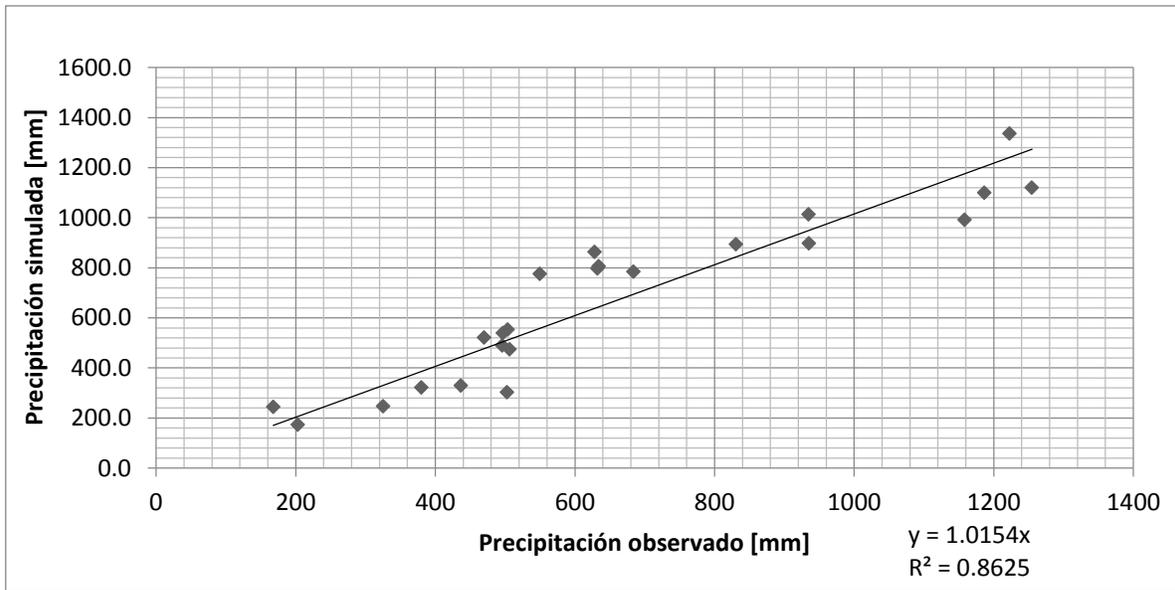


Figura 8-8 Comparación entre simulación y real de la precipitación de cada Año hidrológico entre 1991 y 2014 estación el Yeso

Para la simulación de la estación olivares, además de ocupar la estación Maitenes, se ocupara El yeso. En el caso de la estación El Yeso como base se ocuparon los datos de la Figura 8-13.

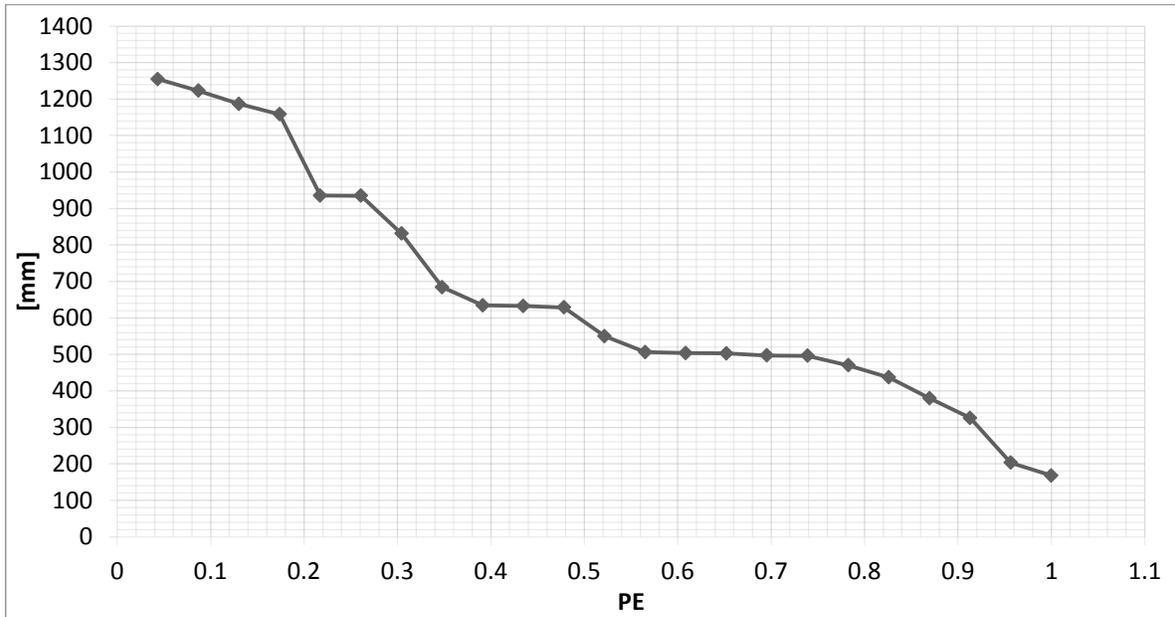


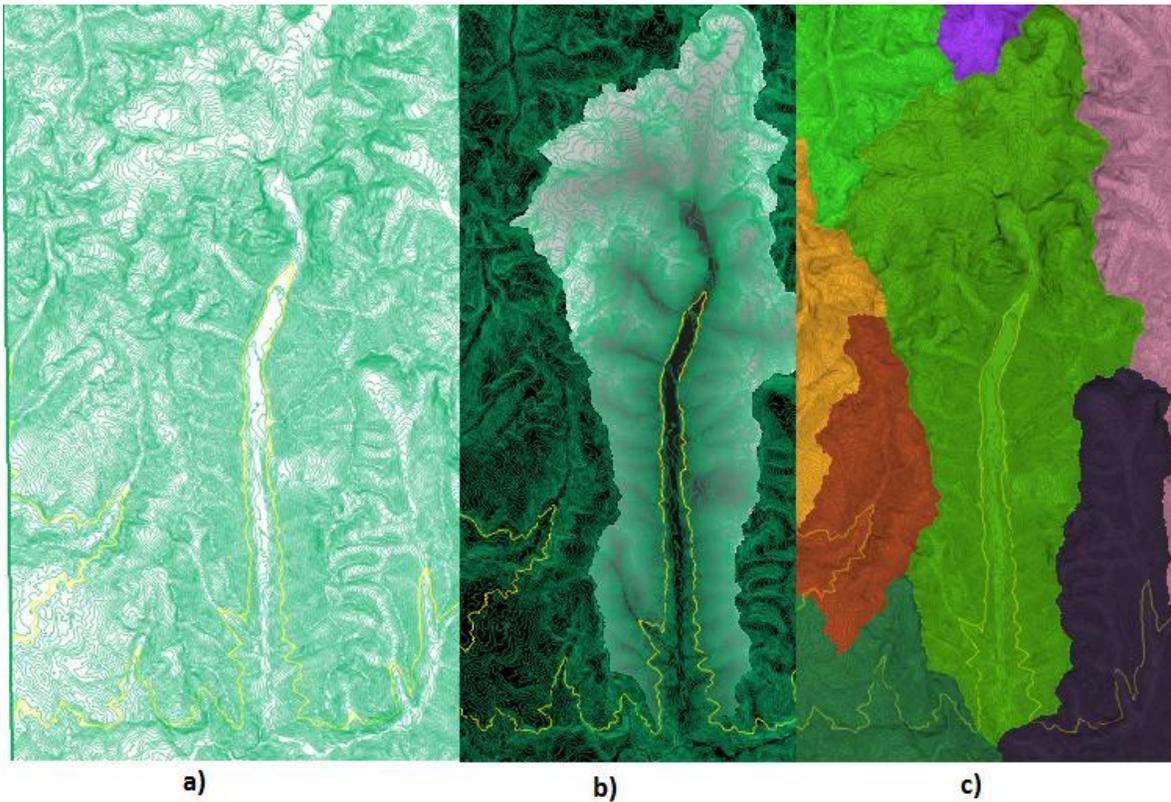
Figura 8-9 Curva de Duración de la precipitación anual en estación El Yeso

Finalmente con la metodología validada en dos estaciones cercanas, se procedió a simular una estación Olivares en la cuenca en base a los datos de las estaciones maitenes, el yeso y el promedio de ellas. Los resultados se encuentran en el capítulo de precipitaciones del informe

## Nieve

Con respecto al parámetro de la nieve en el modelo se realizó el siguiente análisis:

Con la información del “Capítulo 3: Zona de estudio”, se pueden generar las curvas de nivel que delimitaran el área bajo la cual la precipitación es líquida. Mediante el programa Qgis se generan las curvas de nivel de la cuenca Olivares, en la Figura 8-10 a) se marca con amarillo la curva de nivel correspondiente a los 2500 msnm, en la Figura 8-10 b) se delimita la cuenca según el DEM con el que se ha trabajado y se aísla del resto del DEM para analizar mejor los límites de la curva, finalmente en la Figura 8-10 c) se tiene la curva de nivel con los límites de la cuenca y las alledañas, de tal forma que se pueda aislar sin problemas.



*Figura 8-10 Curvas de nivel de la cuenca Olivares*

En la Figura 8-11 se muestran las curvas de nivel de la cuenca cada 50 metros y como queda al aislarla en el DEM. Todo esto con el objetivo de obtener un área en la que hay precipitación líquida y donde cae nieve (fuera de esa área)

Para determinar el área de la cuenca que se encuentra bajo los 2500 msnm se realizó una comparación con el modelo 3D de la cuenca con una elevación a la misma altura. En la Figura 8-12 se aprecia que al ser ambas iguales es posible realizar una estimación mediante la función “medir área” del software Qgis.

El área bajo los 2500 msnm corresponde a 60 km<sup>2</sup> aprox, lo que corresponde a un 11.3% de la cuenca. Con esta estimación es posible determinar la precipitación que durante el periodo de invierno cae sobre la cuenca y la que queda como reserva para el periodo de derretimiento.

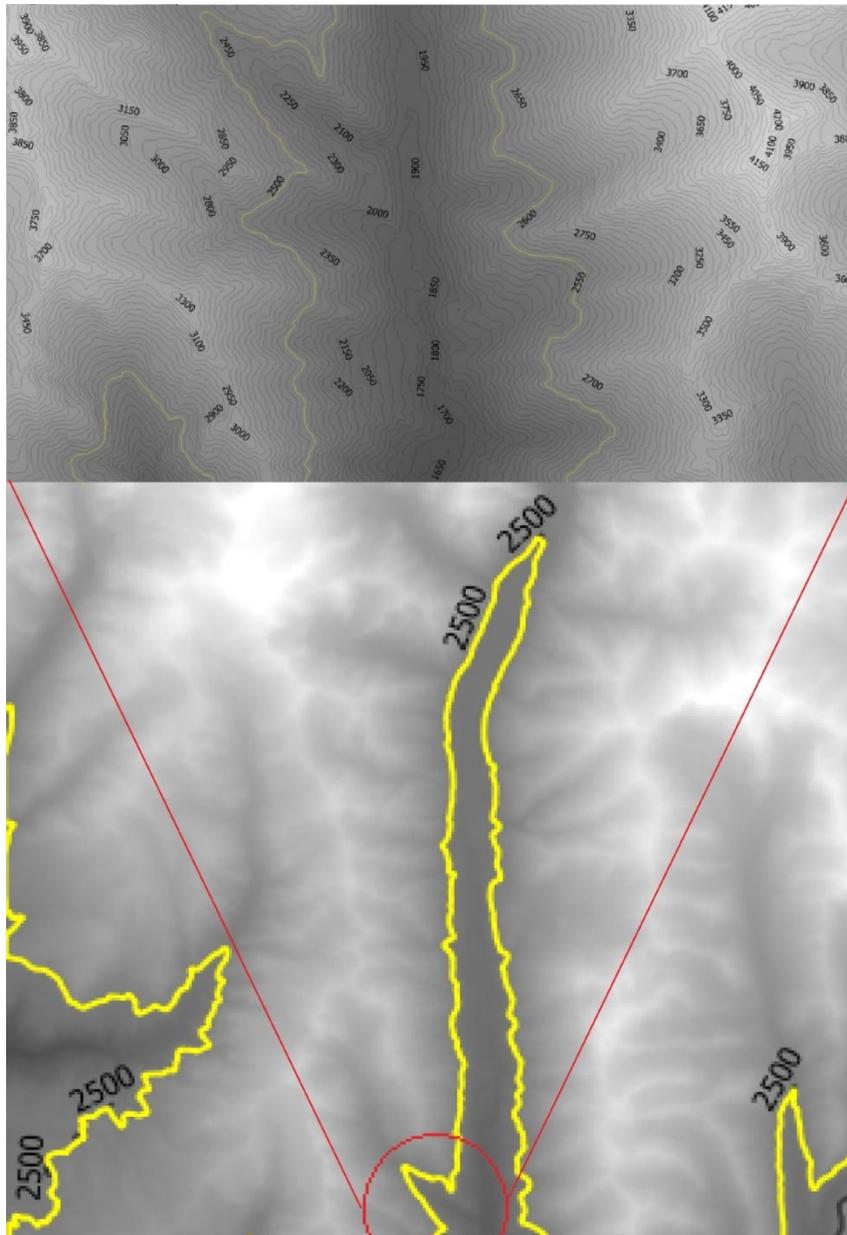
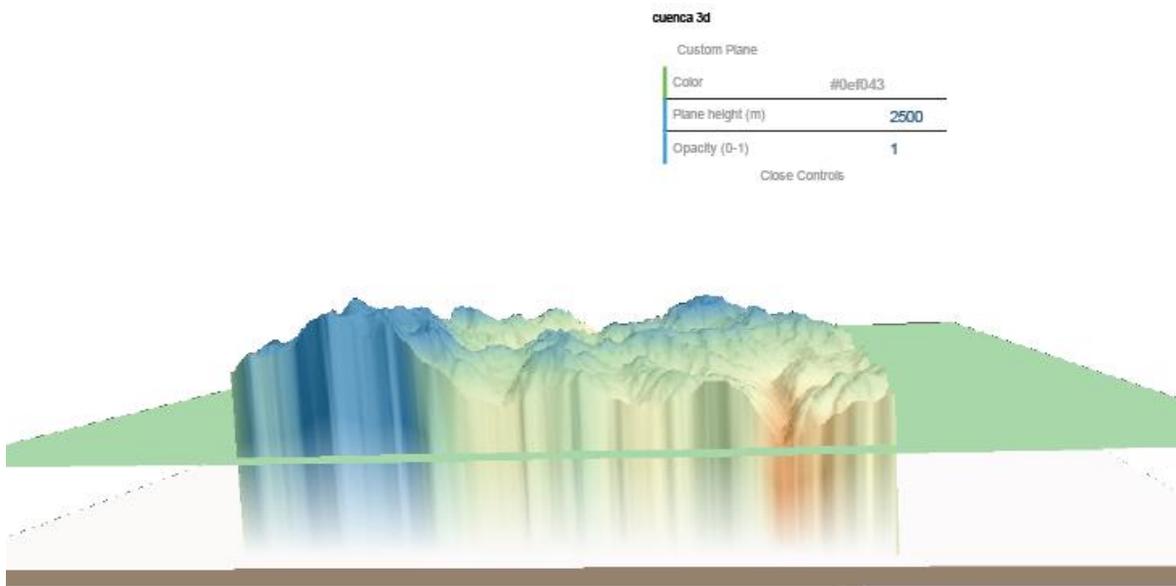
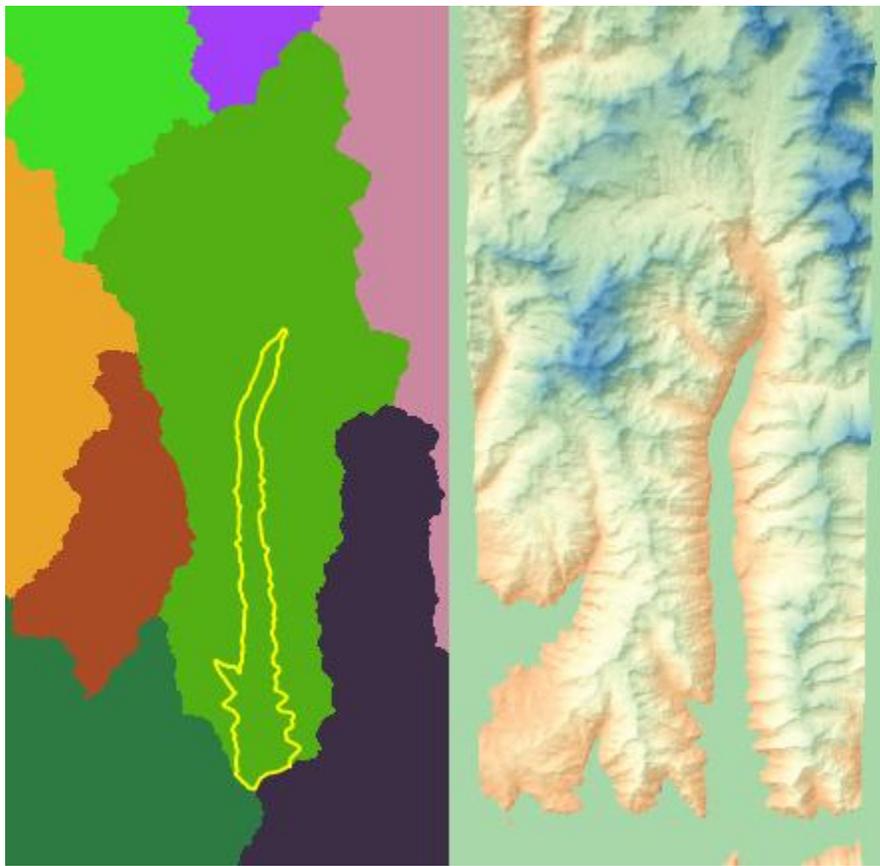


Figura 8-11 Curva de nivel 2500 msnm cuenca Olivares



(a)



b)

c)

Figura 8-12 Área bajo los 2500 msnm de la cuenca olivares

La Tabla 8-8 muestra que para todas las estaciones estudiadas cerca del 89% de la precipitación total se da durante el periodo de invierno, vale decir entre los meses de abril y septiembre. La excepción que requiere un ajuste, es durante el año hidrológico 2004-2005 en que la media se aleja de lo normal para todos los demás años, siendo cercana al 70%. La estación Maitenes no tiene su estadística completa, ya que el relleno que se realizó para esta estación es de carácter anual y no mensual.

Año hidrológico	INVIERNO RIECILLOS	INVIERNO DGA	INVIERNO RETEN	INVIERNO MAITENES	INVIERNO YESO
	%	%	%	%	%
1991-1992	93.33	84.14	83.79		91.39
1992-1993	97.41	98.65	83.79		83.47
1993-1994	98.75	97.43	95.93		96.86
1994-1995	91.37	95.08	97.28		91.38
1995-1996	91.60	98.90	92.73	97.13	94.08
1996-1997	83.46	90.17	97.09	80.88	82.00
1997-1998	90.78	88.65	83.26	89.07	89.57
1998-1999	85.81	80.78	86.58	90.20	94.68
1999-2000	94.90	87.99	94.12	89.46	82.86
2000-2001	93.58	94.00	89.20	95.60	93.74
2001-2002	91.74	98.36	96.66	0.00	95.73
2002-2003	96.37	98.05	94.31	92.88	93.13
2003-2004	87.29	84.85	95.93	87.80	82.92
2004-2005	64.16	75.34	86.03	70.25	54.96
2005-2006	89.71	93.85	69.39		96.90
2006-2007	89.11	77.52	95.68		83.04
2007-2008	79.83	91.93	78.47		87.17
2008-2009	98.33	100.00	95.72	99.91	98.29
2009-2010	98.57	95.94	99.57	96.82	96.87
2010-2011	66.27	77.67	92.16	69.69	80.40
2011-2012	89.19	97.03	81.14	91.40	85.22
2012-2013	89.57	71.28	95.71	78.21	80.83
2013-2014	98.60	100.00	80.14	99.63	92.76
	PROMEDIO				
	89.55	90.33	89.77	83.06	88.18

Tabla 8-8 Relación porcentual de precipitación caída en el periodo abril-septiembre versus octubre-marzo

Entonces para el periodo de deshielo tendremos dos componentes de la precipitación:

$P_1 =$  Precipitación de invierno derretida verano

$P_2 =$  Precipitación de verano

En donde:

$$P_1 = P * 0.89 \quad (8-16)$$

$$P_2 = P * 0.11$$

En términos prácticos, dado que la precipitación será multiplicada por el área de la cuenca, en el caso de cada precipitación se tiene:

$A_1 =$  *Area correspondiente a la precipitación de invierno derretida verano*

$A_2 =$  *Area correspondiente a la precipitación de verano*

En donde si consideramos un área total  $A_t$ :

$$A_1 = A_t * (1 - 0,113)$$

$$A_2 = A_t$$

## Anexo III

Caudal de la cuenca

Olivares en régimen

natural

Aproximadamente a 13 kilómetros del final de la cuenca se encuentra la bocatoma Olivares que abastece un porcentaje importante de la central de pasada Alfalfal que aporta energía eléctrica al Sistema Interconectado Central. La central toma aguas de 2 ríos y 2 esteros de la zona mediante las bocatomas Olivares, Colorado, la Jarilla y Parraguirre, que tienen caudales de diseño de 14 m<sup>3</sup>/s, 16 m<sup>3</sup>/s, 1.5 m<sup>3</sup>/s y 4 m<sup>3</sup>/s respectivamente. Con esta información se puede establecer una relación porcentual de cuanto aporta cada bocatoma al total del sistema.

La central Alfalfal tiene una generación media anual de 860 GWh, con promedios de 290 GWh y 570 GWh en invierno y verano respectivamente; su potencia instalada es de 160 Mw y tiene un factor de planta de 0.59, la caída de agua es de 682 metros (CHILGENER S.A., 1992).

Junto con los datos de diseño de la central y la información de demanda energética mensual se puede establecer la cantidad de caudal con la cual ha operado la central desde sus inicios hasta la fecha de estudio. La información de demanda energética se encuentra en los medios de comunicación del sistema interconectado central (CDEC-SIC, 2002) (CDEC-SIC, Operación Real, 2014). En la Tabla 8-9 se muestra un resumen de la generación anual de la central.

GENERACIÓN BRUTA (MWh)	
Alfalfal	Total
1991	308500.0
1992	922600.0
1993	711200.0
1994	856700.0
1995	883800.0
1996	687200.0
1997	693700.0
1998	804400.0
1999	737300.0
2000	785333.4
2001	919320.5
2002	926261.0
2003	791778.5
2004	840940.7
2005	878534.6
2006	1033939.1
2007	939416.1
2008	907391.9
2009	893803.6
2010	845500.0
2011	671519.4
2012	693624.9
2013	716573.6

Tabla 8-9 Generación Bruta Central Alfalfal entre los años 1991-2013 en MWh.

La ecuación (8-17) que corresponde a una modificación de la ecuación de potencia para energía eléctrica permite realizar la transformación de energía en caudal ya sea mensual o anual considerando los aspectos de diseño de la central y realizando las transformaciones correspondientes de unidades.

$$Q = \frac{Pot}{g * H * \eta * \rho_w} \quad (8-17)$$

En donde

$$Q = \text{Caudal} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

$$Pot = \text{Potencia [W]}$$

$\eta = \text{Eficiencia}$

$H = \text{Altura de caída [m]}$

Para la ecuación (8-17) se consideró una eficiencia de 0.95 y altura de caída de 682 metros. Los resultados obtenidos se ponderaron por un factor correspondiente al porcentaje de aporte del río Olivares en el proyecto, que según los caudales de diseño debería ser alrededor del 40%, esto con la finalidad de obtener la cantidad de caudal correspondiente al río y así completar la estadística.

Para corroborar la fidelidad de la información obtenida se comparó la nueva estadística, compuesta por los datos de la estación Olivares y la proporcionada por la demanda energética, con la estadística antigua de la estación Olivares entre los años 1962 y 1983 que sirvieron como base para el proyecto de la central Alfalfal (CHILGENER S.A., 1992). Con esto se logró determinar el porcentaje de participación del río Olivares en el proyecto, quedando finalmente después de los ajustes estadísticos en un 30% para los meses de mayo a agosto, 35% abril y septiembre y un 40% de octubre a marzo, el resto del caudal debería ser captado por las otras bocatomas del proyecto. En la Tabla 8-10 se pueden ver los resultados en donde se comparan los máximos, mínimos y el promedio para cada mes entre los años 1991-2013 versus los años 1962-1983. La similitud entre ambas estadísticas valida la corrección de datos realizada. En la Figura 8-13 se pueden apreciar los datos promedios de la Tabla 8-10 en lo que sería un año hidrológico. En particular, las mayores diferencias se ven para los meses de enero y febrero, meses en los cuales el caudal producto del deshielo está en su peak. El primero de los meses puede deber su diferencia a la crecida del año 1992 que fue la más alta registrada por la estación en toda su historia de datos. Si ese dato se descartara para validar la serie, el promedio de enero para la estadística de los años 1990 a 2013 pasaría de 22.72 a 20.14 m<sup>3</sup>/s, valor que es prácticamente igual que el promedio de enero para la estadística de 1962-1983. En el caso de los caudales de febrero si bien es cierto existe una diferencia, esta no es muy grande y puede deberse a factores climáticos asociados con las estaciones. Si se hiciera el ajuste en que para el mes de febrero la central alfalfal se abastece de un 50% del Río Olivares en vez de un 40%, los datos serían coincidentes, sin embargo no existe una justificación para este supuesto con la cantidad de datos que existen.

	Estadística años 90-2000 [m <sup>3</sup> /s]			Estadística años 60-80 [m <sup>3</sup> /s]		
	Promedio	máximo	Min	promedio	Máximo	min
ENE	22.7	81.4	10.2	20.4	37.1	10.6
FEB	15.3	27.5	10.2	18.7	30.4	12.1
MAR	10.2	18.7	2.9	11.2	17.9	7.6
ABR	5.7	8.5	3.8	5.8	9.3	3.5
MAY	4.2	8.5	2.5	3.9	6.0	2.2
JUN	3.5	5.2	1.8	3.2	4.6	2.1
JUL	3.3	5.0	1.6	3.0	4.6	2.0
AGO	3.3	4.8	2.0	3.2	5.0	2.0
SEP	4.3	5.8	2.9	4.0	9.1	1.9
OCT	6.3	9.1	3.2	6.1	11.5	2.0
NOV	9.8	15.8	5.1	9.7	19.5	3.9
DIC	16.1	33.3	7.9	16.6	35.7	6.5

Tabla 8-10 Estadísticas de la estación Olivares para un periodo natural y otro corregido

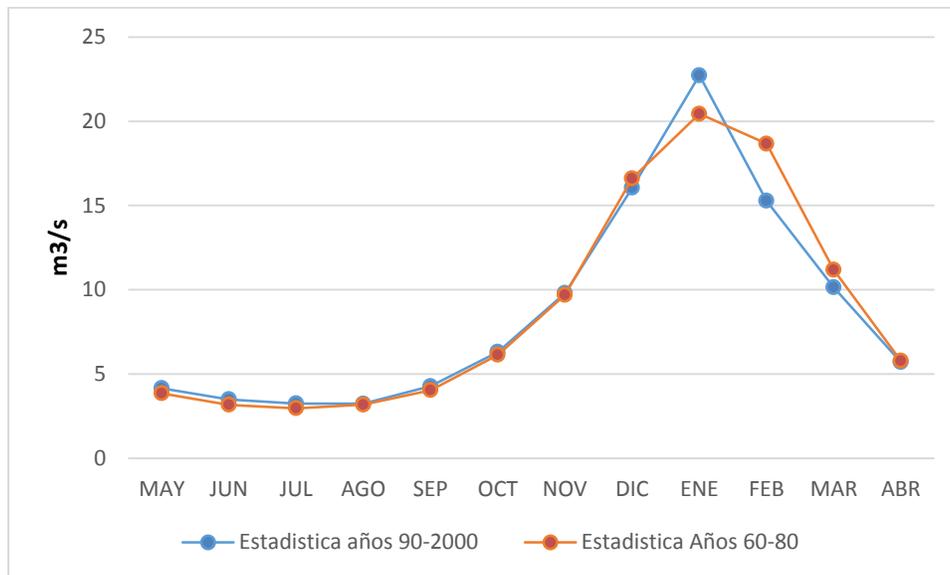


Figura 8-13 Serie corregida de la estadística de la Estación Olivares entre los años 1991-2013 versus Serie natural de la Estación Olivares entre los años 1962-1983.

Con los datos de caudal validados para la estación Olivares se construyen las series del caudal medio anual y el caudal medio para el periodo de deshielo que permiten establecer el balance para cada uno de los años de estudio.

# Anexo IV

## Campaña de terreno

El día 2 de febrero del 2015 se realizó una campaña de terreno hacia la cuenca del Olivares que tenía como objetivo lo siguiente:

- Reconocimiento visual de la cuenca y sus características
- Reconocimiento visual de los glaciares de la cuenca
- Evaluación en terreno de la disponibilidad caudales, nieve y glaciares
- Realizar una toma de muestras de agua de glaciares para realizar un posterior análisis químico de estas.

El vuelo comenzó cerca de las 10:00 am en el aeródromo de Tobalaba y culminó en el mismo lugar a las 16:00 pm. El vuelo en helicóptero duró alrededor de 30 minutos según las condiciones climáticas. Durante la estadía en el lugar se tomaron fotografías de los glaciares y de la cuenca Olivares. Principalmente se fotografió el glaciar Olivares Alfa ya que la toma de muestras de agua se realizó en el sector de este glaciar y en un estero proveniente del deshielo del glaciar Paloma y Altar Norte. En el siguiente anexo se hará un detalle más específico respecto al muestreo de las aguas de los glaciares. Las fotografías tomadas se detallan de acá en adelante:



*Anexo II Fotografía 1 Glaciar Olivares Alfa en su parte mas alta*

En el Anexo II Fotografía 1 se aprecia el glaciar Olivares Alfa en su parte más alta, de donde se distinguen las grietas que se producen por el movimiento que queda marcado en líneas de avance.

Por la fecha en la cual se hizo esta visita a terreno, lo que se ve es principalmente hielo sin presencia de nieve.

En el Anexo II Fotografía 2 se observa en primer plano al glaciar Olivares Alfa, esta vez en su parte inferior, en donde se puede distinguir las marcas del movimiento y algunas grietas. Aunque el color es principalmente blanco, en algunas zonas existen manchas de polvo que se asemejan mucho al terreno, esto debido a las condiciones de viento que existen en el sector, que acarrea polvo hacia la parte más baja de los glaciares. Al lado izquierdo del glaciar se puede apreciar un pedazo del glaciar que prácticamente se está separando del glaciar principal y pasara a ser otro fragmento más del Olivares Alfa como los que se aprecian al fondo de la fotografía hacia la izquierda. Por otro lado, al fondo hacia la derecha se pueden apreciar los glaciares Olivares Beta y Olivares gamma.



*Anexo II Fotografía 2 Vista del glaciar Olivares Alfa en primer plano y al fondo el glaciar Olivares Beta y Gamma*

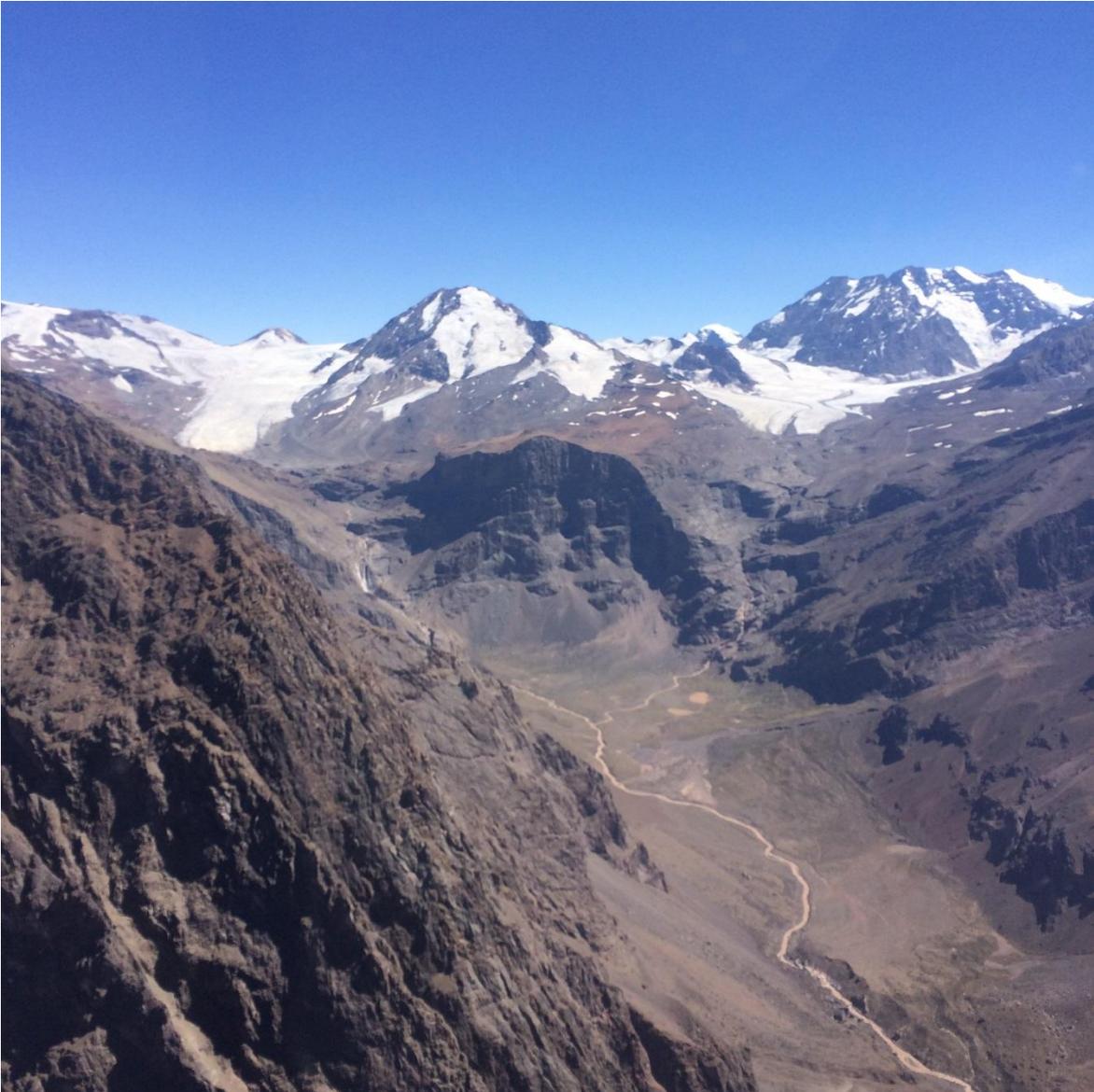
En el Anexo II Fotografía 3 y el Anexo II Fotografía 4 muestran la entrada al cajón Olivares junto con el Río Olivares que tiene un característico color chocolate. Al fondo de la segunda imagen se puede apreciar el deshielo proveniente del Juncal Sur. En todo el sector no se aprecia nieve, salvo en las altas cumbres al fondo de la imagen o en el sector alto de glaciares.



*Anexo II Fotografía 3 Cuenca del Olivares*

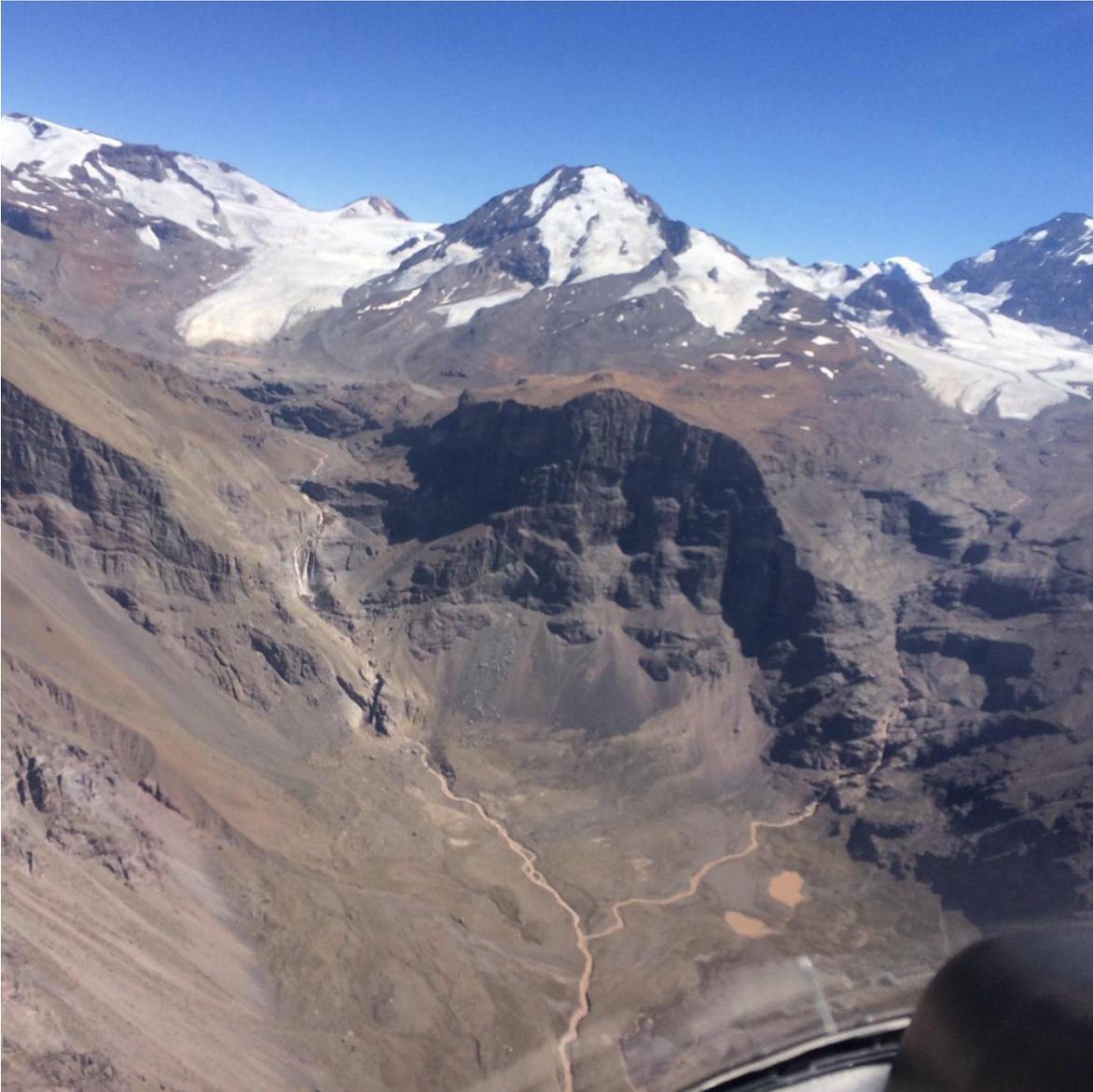


*Anexo II Fotografía 4 Rio Olivares en primer plano y al fondo glaciar Juncal Sur*



*Anexo II Fotografía 5 Río Olivares en primer plano y al fondo glaciar Juncal Sur a la derecha y glaciar Olivares Gamma a la izquierda*

En el Anexo II Fotografía 5 se puede apreciar una imagen final de la cuenca antes del salto del Olivares y el punto en que se juntan los deshielos provenientes del sector de los glaciares Olivares (izquierda) y el deshielo proveniente del Juncal sur (derecha). En la imagen, al fondo se aprecia el glaciar Olivares Gamma (izquierda) y el glaciar Juncal Sur (derecha). Tanto en esta imagen como en las anteriores se puede apreciar la forma en U del valle, que denota el pasado glaciar de toda la zona y que muestra que en otros tiempos todos los glaciares eran parte de un solo gran bloque.



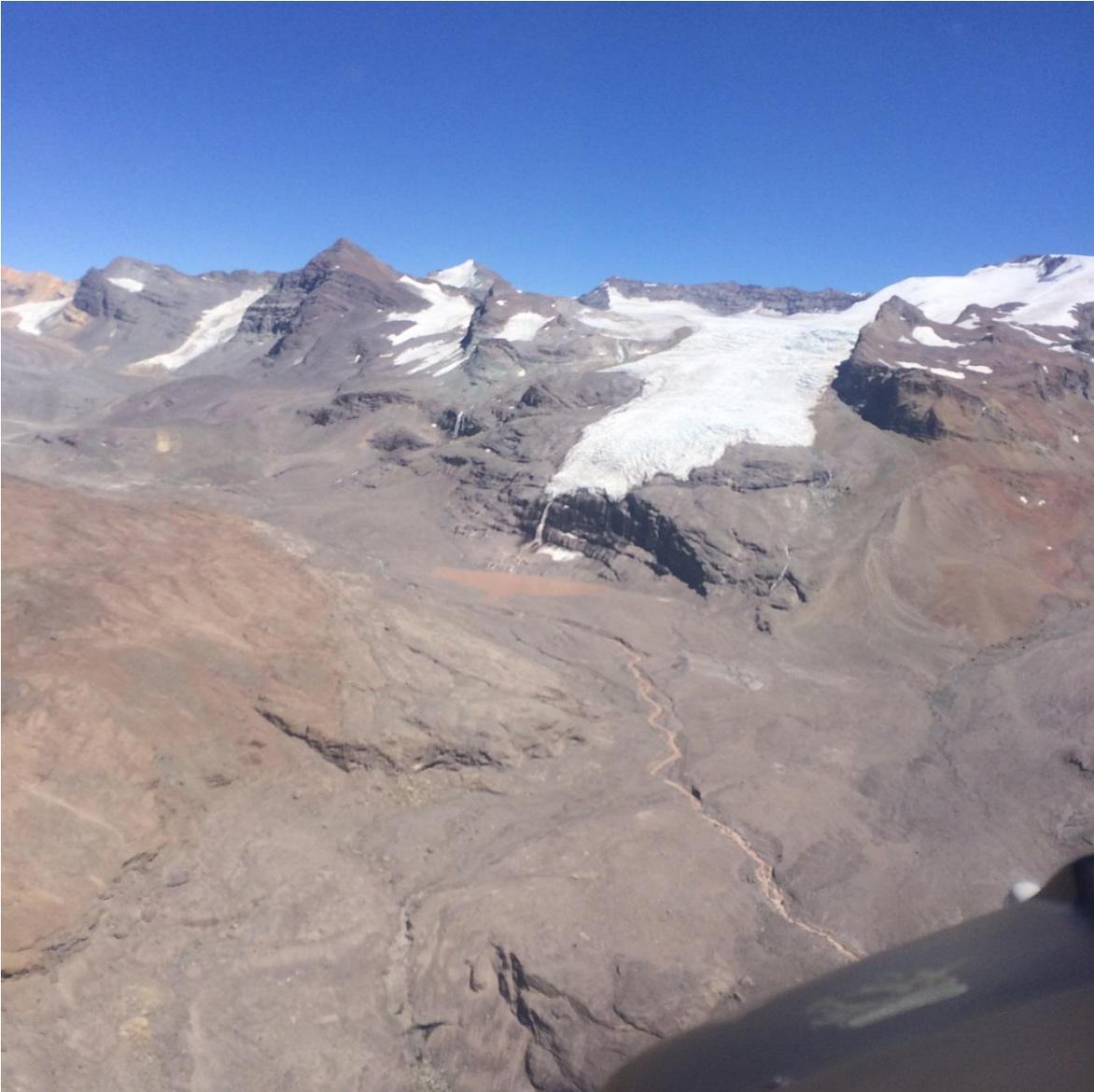
*Anexo II Fotografía 6 Salto del Olivares. Escurrimientos provenientes desde Juncal Sur (derecha) y de los glaciares Olivares (izquierda)*

En el Anexo II Fotografía 6 y el Anexo II Fotografía 7 se puede ver más cerca el salto del Olivares y la unión de ambos esteros productos de los deshielos. Se observa una vista general de los glaciares Olivares Gamma y Juncal Sur.



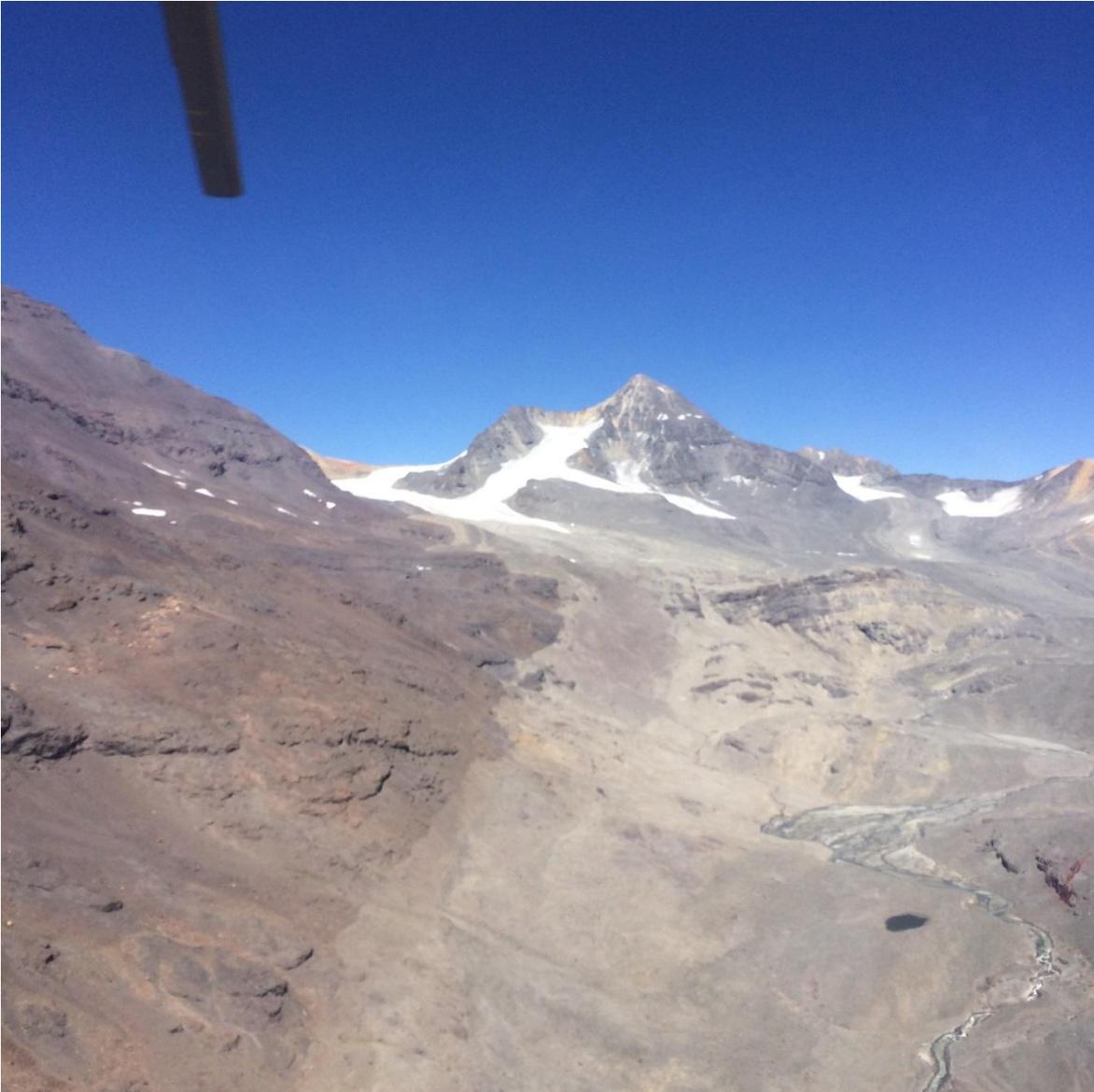
*Anexo II Fotografía 7 Salto del Olivares. Glaciar Juncal Sur a la derecha*

En el Anexo II Fotografía 8 se puede apreciar el principio del deshielo del glaciar Olivares Beta y la laguna que se forma inmediatamente después de la cascada originada en la boca del glaciar. Desde esa laguna se produce el escurrimiento que se junta con el escurrimiento del Olivares Alfa y sus fragmentos y parte del glaciar altar que viene aguas arriba de este punto, para aguas abajo juntarse con el escurrimiento del glaciar Olivares Gamma y pasar a formar el salto del Olivares que se junta con el deshielo del Juncal Sur para que finalmente formen parte del río Olivares.



*Anexo II Fotografía 8 Glaciar Olivares Beta, su deshielo y laguna glaciar*

El escurrimiento que viene aguas arriba del glaciar Olivares Beta se puede apreciar en el Anexo II Fotografía 9, en donde hacia la derecha de la imagen se puede ver el río proveniente del glaciar Olivares Alfa (arriba a la izquierda) junto con el Glaciar Altar y otros fragmentos del Olivares alfa (arriba a la derecha).



*Anexo II Fotografía 9 Vista del Glaciar Olivares Alfa*



*Anexo II Fotografía 10 Deshielo del Glaciar Olivares Alfa, lugar de monitoreo de caudal y de punto de muestreo de calidad de aguas.*

Una vez descendidos del helicóptero se comienzan a preparar los instrumentos y los frascos de muestras. El primer lugar al que se accede es el punto que llamaremos Olivares Alfa, que corresponde al deshielo del glaciar Olivares Alfa. Se escoge el punto en donde el CECS ha estado realizando aforos durante gran parte del verano. En el Anexo II Fotografía 10 se puede apreciar la estructura que se instaló para este fin. Dada la morfología del sector, existen una serie de pequeños cursos de agua que tienen a infiltrarse por el suelo y aparecer metros más abajo, producto de la estructura de morrenas del sector; esto produce que exista un porcentaje de caudal que en la medición del punto de aforo se “pierda” en comparación con la ablación del glaciar, sin embargo, estos flujos al volver a reaparecer metros más abajo hacen que el balance del río calce con los valores de ablación de los glaciares, reafirmando la tesis de que no existen flujos

de agua subterránea con tiempos de permanencia largos, si no que existen flujos a muy pocos metros de la superficie y que circulan rápidamente por las quebradas, ahora bien, la definición de superficie también es dinámica, ya que por la cantidad de nieve que cae y el viento, esta superficie tiende a cambiar rápidamente. Uno de los ejemplos de esto es que el CECS en campañas de 1 año a otro al dejar objetos (instrumentos o cajas, etc.), estos han aparecido varios metros hacia abajo alejados de su punto original. Aunque en el Anexo II Fotografía 11 no se aprecia un gran caudal, este tiende a crecer hacia las 18:00 aprox. según datos del CECS en lo registrado durante el verano 2013-2014 y finales del 2014.



*Anexo II Fotografía 11 Vista aguas arriba del punto de monitoreo de caudales del Olivares Alfa y de muestreo de calidad de aguas.*

En el Anexo II Fotografía 12 que corresponde al deshielo proveniente del glaciar Altar, en donde se incluye el glaciar Paloma norte y el deshielo de fragmentos del glaciar Olivares Alfa, se aprecia una

mayor cantidad de flujo, sin embargo al día de hoy no existen mediciones de caudal en este punto. En esta imagen se puede ver el uso de la sonda multiparámetro, lo que correspondería a la segunda toma de muestras en el sector.



*Anexo II Fotografía 12 Deshielo del glaciar altar y fragmentos del olivares. Medición de variables con la sonda multiparametros*



*Anexo II Fotografía 13 Vista aguas abajo del punto de monitoreo de calidad de aguas del deshielo del glaciar Altar y fragmentos del Olivares.*

El Anexo II Fotografía 13 corresponde a la vista aguas abajo del sector en donde se toma la segunda muestra de calidad de agua. Tal como se dijo anteriormente no existe una toma de caudales en este sector para poder comparar con otro punto. El CECS en mediciones tomadas durante el verano 2013-2014 en donde confluyen las aguas del Olivares Alfa y el Olivares beta, justo debajo de su laguna como se aprecia en el Anexo II Fotografía 8 se han registrado caudales desde los 0.5 m<sup>3</sup>/s hasta los 3.6 m<sup>3</sup>/s (CECS, Informe N° 2 de Avance: Línea de Base glaciológica para glaciares de la cuenca alta del Río Olivares y otras cuencas aledañas, 2014). Valores un tanto extremos, pero que en las 13 mediciones realizadas con el método de la conductividad se ha obtenido un promedio de 1.6 m<sup>3</sup>/s, valor que se acerca bastante a lo proyectado por el estudio considerando que no están incluidos los glaciares Olivares Gamma y Juncal Sur.



*Anexo II Fotografía 14 Fragmentos del Olivares Alfa*

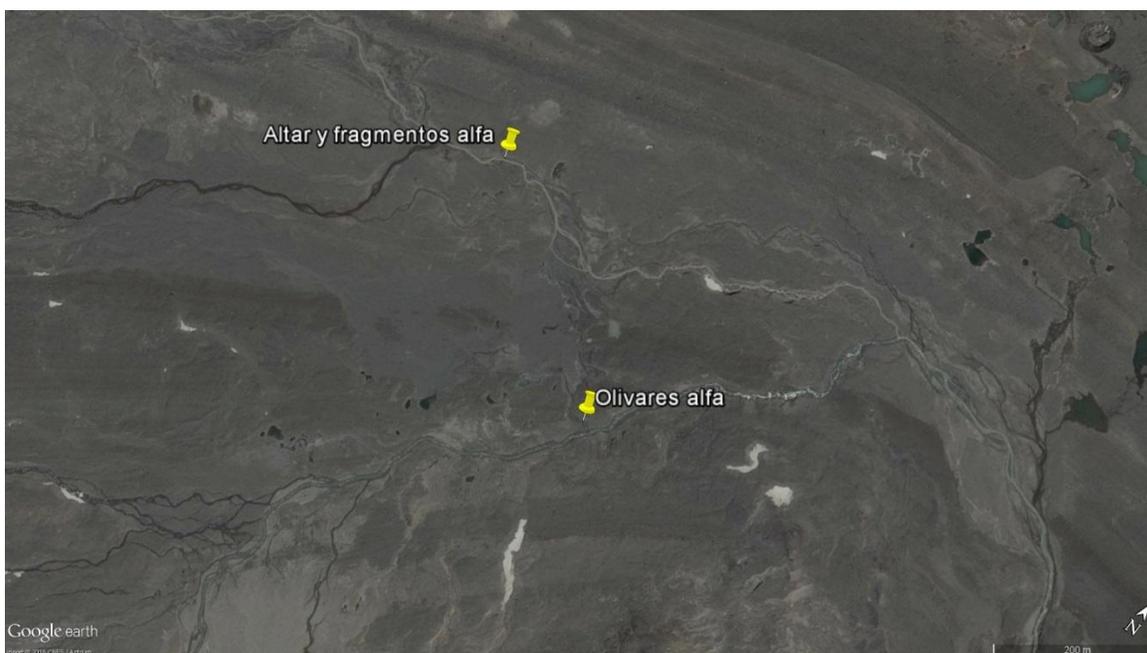
# Anexo V

## Muestras de calidad de aguas en efluentes glaciares

La muestra de calidad de agua de los esteros de deshielo de los glaciares de la zona Olivares se realizó durante el día 2 de febrero del 2015. El acceso a la zona fue en helicóptero y los puntos a medir fueron determinados en conjuntos con el Centro de estudios científicos (CECS). En la imagen Anexo V Fotografía 1 y Anexo V Fotografía 2 proporcionadas por Google Earth, se pueden observar los puntos en los cuales se realizó dicha campaña.



*Anexo V Fotografía 1 Vista general del lugar de la muestra de calidad de aguas*



*Anexo V Fotografía 2 Vista acercada del lugar de la muestra de calidad de aguas*

Para ambos puntos se tomaron 2 grupos de muestras:

- Ag, Al (total y disuelto), As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Cl-, Co, carbonato, Cr, CrVI, Cu (total y disuelto), Fe (total y disuelto), Bicarbonato, K, Mg, Mn (total y disuelto), Mo (total y disuelto), Na, Ni, nitrato, Pb, fosfato, Se, sulfato, sólidos totales disueltos, V, Zn, DBO y DQO.
- Redox, PH, O2, % O2, conductividad, TDS, T°.

Para el primer grupo se tomaron muestras en 4 frascos de ½ litro, vale decir, en total 8 frascos. Las muestras fueron llevadas el mismo día al laboratorio SGS Chile Ltda para su análisis.

El segundo grupo de muestras se tomaron en terreno con una sonda multiparámetro con GPS HI 98290 Hanna instruments y se obtuvieron los resultados in situ que se presentan en la siguiente tabla:

Variables	Puntos de monitoreo		Unidad
	Olivares Alfa	Altar y Fragmentos Alfa	
Hora	11:30	12:49	am/pm
Redox	19	-15.8	mV
PH	6.7	7.5	
O2	7.37	6.78	mg/l
% O2	95.7	96	%
Conductividad	218	135	µs/cm
TDS	110	67	mg/l
T°	6.9	9.64	°C
Altura	4007	4013	msnm
Coordenada S	33° 9.872'	33° 9.769'	
Coordenada O	70° 12.471'	70° 12.635'	

Anexo V Tabla 1 Valores de la sonda multiparámetro para los puntos de monitoreo

Los resultados del primer grupo son los siguientes:

CODIGO MUESTRA	FECHA MUESTREO	PARAMETRO	LIMITE	UNIDAD	RESULTADO	LABORATORIO	CODIGO MUESTRA	INFORME	TIPO MUESTRA
ES15-05110.001	02-02-2015	Alcalinidad Total (CaCO3)	2	mg/l	34	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Aluminio	0.05	mg/l	16.5	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Aluminio Disuelto	0.05	mg/l	0.07	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Arsénico	0.001	mg/l	0.010	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Bario	0.01	mg/l	0.14	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Berilio	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Bicarbonatos	0.2	mg/l	41	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Bismuto	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Boro	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Cadmio	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Calcio	0.01	mg/l	37	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Carbonatos	0.2	mg/l	<0.2	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Cinc	0.01	mg/l	0.23	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Cloruro	0.02	mg/l	0.38	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Cobalto	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Cobre	0.01	mg/l	0.59	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Cobre Disuelto	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Cromo	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Cromo Hexavalente	0.05	mg/l	<0.05	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	DBO5 a 20°C	2	mg/l	3	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	DQO	2	mg/l	26	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial

ES15-05110.001	02-02-2015	Fosfato (como P)	0.2	mg/l	<0.2	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Hidróxido	0.2	mg/l	<0.2	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Hierro	0.01	mg/l	30.6	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Hierro Disuelto	0.01	mg/l	0.05	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Magnesio	0.01	mg/l	14.3	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Manganeso	0.01	mg/l	1.52	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Manganeso Disuelto	0.01	mg/l	0.27	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Molibdeno	0.005	mg/l	0.006	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Molibdeno Disuelto	0.005	mg/l	<0.005	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Niquel	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Nitrato	0.02	mg/l	0.13	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Nitrógeno de Nitrato	0.02	mg/l	0.03	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	pH 25°C Laboratorio	0.1	UpH	7.8	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Plata	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Plomo	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Potasio	0.01	mg/l	7.71	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Selenio	0.001	mg/l	<0.001	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Sodio	0.01	mg/l	2.92	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Sólidos Totales Disueltos	5	mg/l	120	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Sulfato	0.02	mg/l	47.6	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	T° de medición PH	0	°C	23	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial
ES15-05110.001	02-02-2015	Vanadio	0.1	mg/l	<0.10	SGS	Altar y Frag. Alfa	ES15-05110	Agua Superficial

CODIGO MUESTRA	FECHA MUESTREO (Ingles)	PARAMETRO	LIMITE	UNIDAD	RESULTADO	LABORATORIO	CODIGO MUESTRA	INFORME	TIPO MUESTRA
ES15-05108.001	02-02-2015	Alcalinidad Total (CaCO3)	2	mg/l	9.1	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Aluminio	0.05	mg/l	8.31	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Aluminio Disuelto	0.05	mg/l	0.11	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Arsénico	0.001	mg/l	0.006	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Bario	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Berilio	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Bicarbonatos	0.2	mg/l	11	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Bismuto	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Boro	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Cadmio	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Calcio	0.01	mg/l	39	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Carbonatos	0.2	mg/l	<0.2	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Cinc	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Cloruro	0.02	mg/l	1.47	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Cobalto	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Cobre	0.01	mg/l	0.42	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Cobre Disuelto	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Cromo	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Cromo Hexavalente	0.05	mg/l	<0.05	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	DBO5 a 20°C	2	mg/l	2	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	DQO	2	mg/l	11	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial

ES15-05108.001	02-02-2015	Fosfato (como P)	0.2	mg/l	<0.2	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Hidróxido	0.2	mg/l	<0.2	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Hierro	0.01	mg/l	14.2	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Hierro Disuelto	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Magnesio	0.01	mg/l	7.29	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Manganeso	0.01	mg/l	0.59	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Manganeso Disuelto	0.01	mg/l	0.35	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Molibdeno	0.005	mg/l	0.006	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Molibdeno Disuelto	0.005	mg/l	<0.005	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Niquel	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Nitrato	0.02	mg/l	0.10	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Nitrógeno de Nitrato	0.02	mg/l	0.02	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	pH 25°C Laboratorio	0.1	UpH	7.1	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Plata	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Plomo	0.01	mg/l	<0.01	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Potasio	0.01	mg/l	2.91	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Selenio	0.001	mg/l	<0.001	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Sodio	0.01	mg/l	3.25	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Sólidos Totales Disueltos	5	mg/l	138	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Sulfato	0.02	mg/l	158	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	T° de medición PH	S/U	°C	22	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial
ES15-05108.001	02-02-2015	Vanadio	0.1	mg/l	<0.10	SGS	Olivares Alfa	ES15-05108	Agua Superficial

Según la norma de calidad de agua que se aplique asociada a determinado uso se podrá determinar si las aguas presentan una buena o una mala calidad. En principio las aguas tienen a ser similares a aguas subterráneas (a pesar de su naturaleza superficial), pero con mucho mayor turbiedad. Al igual que en toda la zona, el agua presenta niveles de cobre, sulfatos, hierro, entre otros. Lo que devela la naturaleza mineralizada de la zona, sin embargo no se presentan niveles fuera de lo común.

### NCh1333

Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego

Elemento	Unidad	Limite máximo
Aluminio (Al)	mg/l	5,00
Arsénico (As)	mg/l	0,10
Bario (Ba)	mg/l	4,00
Berilio (Be)	mg/l	0,10
Boro (B)	mg/l	0,75
Cadmio (Cd)	mg/l	0,010
Cianuro (CN <sup>-</sup> )	mg/l	0,20
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	mg/l	200,00
Cobalto (Co)	mg/l	0,050
Cobre (Cu)	mg/l	0,20
Cromo (Cr)	mg/l	0,10
Fluoruro (F <sup>-</sup> )	mg/l	1,00
Hierro (Fe)	mg/l	5,00
Litio (Li)	mg/l	2,50
Litio (cítricos) (Li)	mg/l	0,075
Manganeso (Mn)	mg/l	0,20
Mercurio (Hg)	mg/l	0,001
Molibdeno (Mo)	mg/l	0,010
Níquel (Ni)	mg/l	0,20
Plata (Ag)	mg/l	0,20
Plomo (Pb)	mg/l	5,00
Selenio (Se)	mg/l	0,020
Sodio porcentual (Na)	%	35,00
Sulfato (So <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	mg/l	250,00
Vanadio (V)	mg/l	0,10
Zinc (Zn)	mg/l	2,00

Anexo VI

Series de precipitaciones

Cambio Climático

Precipitación Embalse el Yeso

Año	r1		r2		r3	
	Precipitación 2.6	Precipitación 8.5	Precipitación 2.6	Precipitación 8.5	Precipitación 2.6	Precipitación 8.5
2040	1425.5	1297.2	665.2	631.9	754.6	686.7
2041	1018.9	968.0	293.6	273.0	653.5	594.7
2042	503.2	462.9	501.0	455.9	688.9	647.6
2043	566.0	566.0	966.5	898.8	637.2	586.2
2044	731.9	695.3	2493.7	2319.1	511.6	475.8
2045	1013.7	912.3	910.0	819.0	308.6	293.2
2046	458.8	431.3	716.4	680.6	1480.8	1347.5
2047	542.2	530.0	425.6	400.1	485.6	446.8
2048	713.4	663.5	810.0	769.5	1115.5	1026.3
2049	298.3	280.4	1409.4	1268.5	733.2	659.9
2050	570.0	529.0	833.5	775.2	645.1	593.5
2051	884.6	805.0	1002.7	952.6	403.1	378.9
2052	532.7	560.0	1014.3	953.4	1195.9	1124.1
2053	519.4	493.4	1359.1	1291.1	1065.8	969.9
2054	664.4	611.2	675.5	641.7	556.1	500.5
2055	939.3	882.9	633.4	595.4	303.6	282.3
2056	1158.3	1054.1	419.8	390.4	379.0	344.9
2057	983.6	914.7	310.2	282.3	2024.4	1882.7
2058	872.5	828.9	1009.0	918.2	345.3	317.7
2059	570.3	541.8	293.5	264.2	951.2	884.6
2060	374.0	336.6	370.9	337.5	456.9	424.9
2061	888.3	817.2	440.3	396.3	851.9	775.2
2062	836.9	761.6	805.6	725.0	977.8	919.1
2063	418.0	388.7	595.1	553.4	792.1	728.7
2064	321.4	289.3	629.4	579.0	881.9	802.5
2065	1292.4	1214.9	289.1	263.1	814.8	733.3
2066	854.7	786.3	867.2	823.8	460.7	414.6
2067	388.4	365.1	288.2	259.4	1145.0	1053.4
2068	1150.2	1069.7	698.6	642.7	279.7	251.7
2069	605.6	575.3	527.9	496.2	272.6	250.8
2070	791.4	758.0	599.9	557.9	681.6	613.4